

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
18. September 2003 (18.09.2003)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 03/077007 A2

(51) Internationale Patentklassifikation⁷: **G02B 13/00**

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP03/02549

(22) Internationales Anmeldedatum:
12. März 2003 (12.03.2003)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
102 10 782.3 12. März 2002 (12.03.2002) DE

(71) Anmelder (*für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US*): **CARL ZEISS SMT AG [DE/DE]**; Carl-Zeiss-Strasse 22, 73447 Oberkochen (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (*nur für US*): **GOEHNERMEIER, Aksel** [DE/DE]; Hannah-Arendt-Strasse 6, 73431 Aalen (DE). **PAZIDIS, Alexandra** [DE/DE]; Humboldtstrasse 13, 73431 Aalen (DE). **MECKING, Birgit** [DE/DE]; Milanweg 107, 73434 Aalen (DE). **ZACZEK, Christoph** [DE/DE]; Lauterner Strasse 37, 78540 Heubach (DE). **KRAEHMER, Daniel** [DE/DE]; Hegelstrasse 28, 73431 Aalen (DE).

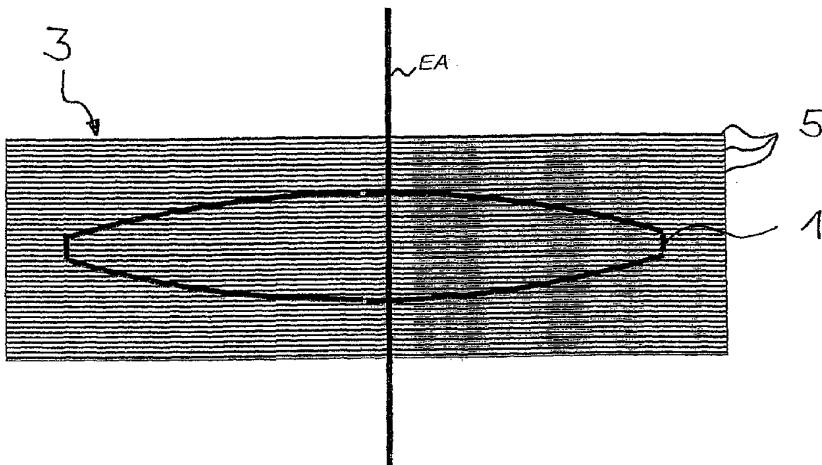
(74) Anwalt: **RUFF, WILHELM, BEIER, DAUSTER & PARTNER**; Kronenstrasse 30, 70174 Stuttgart (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (*national*): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NI, NO, NZ, OM, PH, PL, PT, RO,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: OBJECTIVE LENS CONSISTING OF CRYSTAL LENSES

(54) Bezeichnung: OBJEKTIV MIT KRISTALL-LINSEN



WO 03/077007 A2

(57) Abstract: An objective lens, especially a projection lens for a microlithographic projection illumination system comprising at least one fluoride crystal lens. The disruptive effect of double refraction is reduced by the fact that the lens is a lens (100) having an axis which is approximately perpendicular in relation to the crystal planes {100} or the equivalent crystal planes of the fluoride crystal. In objective lenses consisting of at least two fluoride crystal lenses it is advantageous to arrange the fluoride crystal lenses in such a way that they are skewed in relation to each other. The lens axes of the fluid crystal lenses can point in direction <111> or <110> in addition to direction <100> of the crystal. The disruptive effect of double refraction can also be reduced by using groups with skewed (110) lenses and groups with (111) lenses or groups with (110) lenses. The disruptive effect of double refraction can be further reduced by providing an optical element with a compensating coating.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ,
UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

- (84) **Bestimmungsstaaten (regional):** ARIPO-Patent (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches Patent (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches Patent (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI-Patent (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

- ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

Erklärung gemäß Regel 4.17:

- Erfindererklärung (Regel 4.17 Ziffer iv) nur für US

- (57) **Zusammenfassung:** Objektiv, insbesondere Projektionsobjektiv für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage mit mindestens einer Fluorid-Kristall-Linse. Eine Reduzierung des störenden Einflusses der Doppelbrechung erzielt man, wenn diese Linse eine (100)-Linse mit einer Linsenachse ist, welche annähernd senkrecht auf den {100}-Kristallebenen oder auf den dazu äquivalenten Kristallebenen des Fluorid-Kristalls steht. Bei Objektiven mit mindestens zwei Fluorid-Kristall-Linsen ist es günstig, wenn die Fluorid-Kristall-Linsen gegeneinander verdreht angeordnet sind. Die Linsenachsen der Fluorid-Kristall-Linsen können dabei neben der <100>-Kristallrichtung auch in die <111>- oder in die <110>-Kristallrichtung weisen. Eine weitere Reduzierung des störenden Einflusses der Doppelbrechung erzielt man durch den gleichzeitigen Einsatz von Gruppen mit gegeneinander verdrehten (100)-Linsen und Gruppen mit gegeneinander verdrehten (111)-Linsen oder (110)-Linsen. Eine weitere Reduzierung des störenden Einflusses der Doppelbrechung erzielt man durch die Belegung eines optischen Elements mit einer Kompensations-Beschichtung.

Beschreibung

Objektiv mit Kristall-Linsen

- 5 Die Erfindung betrifft ein Objektiv nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1.

Derartige Projektionsobjektive sind aus der US 6,201,634 bekannt. Dort ist offenbart, daß bei der Herstellung von Fluorid-Kristall-Linsen idealerweise die Linsenachsen senkrecht zu den {111}-Kristallebenen der Fluorid-Kristalle ausgerichtet werden, um

- 10 die Spannungsdoppelbrechung zu minimieren. Die US 6,201,634 geht dabei davon aus, daß Fluorid-Kristalle keine intrinsische Doppelbrechung aufweisen.

Aus der Internet-Publikation „Preliminary Determination of an Intrinsic Birefringence in CaF₂“ von John H. Burnett, Eric L. Shirley, and Zachary H. Levine, NIST Gaithers-

- 15 burg MD 20899 USA (verbreitet am 07.05.01) ist jedoch bekannt, daß Kalzium-Fluorid-Einkristalle auch nicht spannungsinduzierte, also intrinsische Doppelbrechung aufweisen. Die dort präsentierten Messungen zeigen, daß bei Strahlausbreitung in der <110>-Kristallrichtung eine Doppelbrechung von (6.5 ± 0.4) nm/cm bei einer Wellenlänge von $\lambda = 156.1$ nm, von (3.6 ± 0.2) nm/cm bei einer Wellenlänge von $\lambda = 193.09$ nm und von (1.2 ± 0.1) nm/cm bei einer Wellenlänge von $\lambda = 253.65$ nm für Kalzium-Fluorid auftritt. Bei einer Strahlausbreitung in der <100>-Kristallrichtung und in der <111>-Kristallrichtung weist Kalzium-Fluorid dagegen keine intrinsische Doppelbre-

chung auf, wie dies auch von der Theorie vorhergesagt wird. Die intrinsische Doppelbrechung ist somit stark richtungsabhängig und nimmt mit kleiner werdender Wellenlänge deutlich zu.

- 5 Die Indizierung der Kristallrichtungen wird im folgenden zwischen den Zeichen „<“ und „>“ angegeben, die Indizierung der Kristallebenen zwischen den Zeichen „{“ und „}“. Die Kristallrichtung gibt dabei immer die Richtung der Flächennormalen der entsprechenden Kristallebene an. So zeigt die Kristallrichtung $<100>$ in Richtung der Flächennormalen der Kristallebene {100}. Die kubischen Kristalle, zu denen die Fluorid-
- 10 Kristalle gehören, weisen die Hauptkristallrichtungen $<110>$, $<\bar{1}10>$, $<\bar{1}\bar{1}0>$, $<\bar{1}\bar{1}\bar{1}0>$, $<10\bar{1}>$, $<\bar{1}01>$, $<\bar{1}0\bar{1}>$, $<011>$, $<0\bar{1}1>$, $<01\bar{1}>$, $<0\bar{1}\bar{1}>$, $<111>$, $<\bar{1}\bar{1}\bar{1}>$, $<\bar{1}\bar{1}1>$, $<\bar{1}1\bar{1}>$, $<1\bar{1}\bar{1}>$, $<\bar{1}11>$, $<1\bar{1}1>$, $<11\bar{1}>$, $<100>$, $<010>$, $<001>$, $<\bar{1}00>$, $<0\bar{1}0>$ und $<00\bar{1}>$ auf. Die Hauptkristallrichtungen $<100>$, $<010>$, $<001>$, $<\bar{1}00>$, $<0\bar{1}0>$ und $<00\bar{1}>$ sind auf Grund der Symmetrieeigenschaften der kubischen Kristalle
- 15 äquivalent zueinander, so daß im folgenden Kristallrichtungen, die in eine dieser Hauptkristallrichtungen weisen, das Präfix „(100)-“ erhalten. Kristallebenen, die senkrecht zu einer dieser Hauptkristallrichtungen stehen, erhalten entsprechend das Präfix „(100)-“. Die Hauptkristallrichtungen $<110>$, $<\bar{1}10>$, $<\bar{1}\bar{1}0>$, $<101>$, $<10\bar{1}>$, $<\bar{1}01>$, $<\bar{1}0\bar{1}>$, $<011>$, $<0\bar{1}1>$, $<01\bar{1}>$ und $<0\bar{1}\bar{1}>$ sind ebenso äquivalent
- 20 zueinander, so daß im folgenden Kristallrichtungen, die in eine dieser Hauptkristallrichtungen weisen, das Präfix „(110)-“ erhalten. Kristallebenen, die senkrecht zu einer dieser Hauptkristallrichtungen stehen, erhalten entsprechend das Präfix „(110)-“. Die Hauptkristallrichtungen $<111>$, $<\bar{1}\bar{1}\bar{1}>$, $<\bar{1}\bar{1}1>$, $<\bar{1}1\bar{1}>$, $<1\bar{1}\bar{1}>$, $<\bar{1}11>$, $<1\bar{1}1>$ und $<11\bar{1}>$ sind ebenso äquivalent zueinander, so daß im folgenden Kristallrichtungen,
- 25 die in eine dieser Hauptkristallrichtungen weisen, das Präfix „(111)-“ erhalten. Kristallebenen, die senkrecht zu einer dieser Hauptkristallrichtungen stehen, erhalten entsprechend das Präfix „(111)-“. Aussagen, die im folgenden zu einer der zuvor genannten Hauptkristallrichtungen getroffen werden, gelten immer auch für die äquivalenten Hauptkristallrichtungen.

30

Projektionsobjektive und Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlagen sind beispielsweise aus der Patentanmeldung PCT/EP00/13148 der Anmelderin und den darin

zitierten Schriften bekannt. Die Ausführungsbeispiele dieser Anmeldung zeigen geeignete rein refraktive und katadioptrische Projektionsobjektive mit numerischen Aperturen von 0.8 und 0.9, bei einer Betriebswellenlänge von 193nm sowie 157 nm.

- 5 Die Drehung von Linsenelementen zur Kompensation von Doppelbrechungseffekten ist auch in der Patentanmeldung „Projektionsbelichtungsanlage der Mikrolithographie, Optisches System und Herstellverfahren“ (DE 10123725.1) mit dem Aktenzeichen des Anmelders 01055P und dem Einreichungstag 15.05.2001 beschrieben. Der Inhalt dieser Anmeldung soll auch Teil der vorliegenden Anmeldung sein.

10

Aufgabe der Erfindung ist es, Projektionsobjektive für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage anzugeben, bei denen der Einfluß der Doppelbrechung, insbesondere der inintrinsicischen Doppelbrechung wesentlich reduziert ist.

- 15 Gelöst wird diese Aufgabe mit einem Objektiv gemäß Anspruch 1, 8 und 31, einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage gemäß Anspruch 47, einem Verfahren zur Herstellung von Halbleiterbauelementen gemäß Anspruch 48, einem Verfahren zur Herstellung von Objektiven gemäß Anspruch 49, einem Verfahren zur Kompensation von Doppelbrechungseffekten gemäß Anspruch 53 und einem Linsenherstellverfahren gemäß Anspruch 54.

20 Vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung ergeben sich aus den Merkmalen der abhängigen Ansprüche.

- 25 Um den Einfluss der intrinsicischen Doppelbrechung zu minimieren, schlägt Anspruch 1 vor, bei Linsen aus Fluorid-Kristall die Linsenachsen so auszurichten, daß sie mit der <100>-Kristallrichtung zusammenfallen. Die Linsenachsen fallen dann mit einer Hauptkristallrichtung zusammen, wenn die maximale Abweichung zwischen Linsenachse und Hauptkristallrichtung kleiner 5° ist. Dabei müssen nicht alle Fluorid-Kristall-
- 30 Linsen des Objektives eine derartige Ausrichtung der Kristallebenen aufweisen. Diejenigen Linsen, bei denen die Linsenachsen senkrecht auf den {100}-Kristallebenen stehen, werden im Folgenden auch als (100)-Linsen bezeichnet. Die Ausrichtung der Lin-

senachse in <100>-Kristallrichtung hat den Vorteil, daß sich der störende Einfluss der intrinsischen Doppelbrechung, der sich bei Lichtausbreitung in <110>-Kristallrichtung ergibt, erst bei höheren Öffnungswinkeln der Lichtstrahlen bemerkbar macht als für eine Ausrichtung der Linsenachse in <111>-Kristallrichtung. Unter Öffnungswinkel versteht

- 5 man in diesem Zusammenhang den Winkel zwischen einem Lichtstrahl und der optischen Achse außerhalb einer Linse und zwischen dem Lichtstrahl und der Linsenachse innerhalb einer Linse. Erst wenn die Öffnungswinkel in den Bereich des Winkels zwischen der <100>-Kristallrichtung und der <110>-Kristallrichtung kommen, spüren die entsprechenden Lichtstrahlen den Einfluss der Doppelbrechung. Der Winkel zwischen
10 der <110>-Kristallrichtung und der <100>-Kristallrichtung beträgt dabei 45° . Wäre die Linsenachse dagegen in <111>-Kristallrichtung ausgerichtet, so würde sich der störende Einfluss der intrinsischen Doppelbrechung schon bei kleineren Öffnungswinkeln bemerkbar machen, da der Winkel zwischen der <110>-Kristallrichtung und der <111>-Kristallrichtung nur 35° beträgt.

15

Wird die Winkelabhängigkeit der Doppelbrechung beispielsweise durch das Herstellverfahren des Fluorid-Kristalls oder die mechanische Beanspruchung des Linsen, insbesondere Spannungsdoppelbrechung, hervorgerufen, so können die offenbarten Lösungsansätze selbstverständlich ebenfalls zur Reduzierung des störenden Einflusses der Doppelbrechung angewendet werden.

Die Linsenachse ist dabei beispielsweise durch eine Symmetriearchse einer rotations-symmetrischen Linse gegeben. Weist die Linse keine Symmetriearchse auf, so kann die Linsenachse durch die Mitte eines einfallenden Strahlbündels oder durch eine Gerade

- 25 gegeben sein, bezüglich der die Strahlwinkel aller Lichtstrahlen innerhalb der Linse minimal sind. Als Linsen kommen beispielsweise refraktive oder diffraktive Linsen sowie Korrekturplatten mit Freiformkorrekturflächen in Frage. Auch Planplatten werden als Linsen angesehen, sofern sie im Strahlengang des Objektives angeordnet sind.
30 Die Linsenachse einer Planplatte steht dabei senkrecht auf den planen Linsenoberflächen.

Vorzugsweise handelt es sich jedoch bei den Linsen um rotationssymmetrische Linsen.

Objektive weisen eine optische Achse auf, welche von der Objektebene zur Bildebene verläuft. Vorzugsweise sind die (100)-Linsen zentriert um diese optische Achse aufgebaut, so daß auch die Linsenachsen mit der optischen Achse zusammenfallen.

5

Vorteilhaft läßt sich die Erfindung bei Projektionsobjektiven für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage einsetzen, da für diese Objektive extrem hohe Anforderungen an das Auflösungsvermögen gestellt werden. Aber auch bei Prüfobjektiven, mit denen beispielsweise Linsen für Projektionsobjektive durch Vermessung von Wellenfronten mit großer Öffnung getestet werden, wirkt sich der Einfluß der Doppelbrechung störend aus.

10

Bei Objektiven mit großen bildseitigen numerischen Aperturen, insbesondere größer 0,7, treten innerhalb der (100)-Linsen Öffnungswinkel auf, die größer als 25° , insbesondere 15 größer als 30° sind. Gerade bei diesen großen Öffnungswinkeln kommt die Erfindung zum Tragen, die Linsenachsen in <100>-Kristallrichtung zu orientieren. Wären die Linsenachsen in <111>-Kristallrichtung orientiert, so würden die Lichtstrahlen mit Öffnungswinkeln größer als 25° , insbesondere größer als 30° deutlicher den störenden Einfluß der Doppelbrechung spüren, wenn nicht eine der weiter unten beschriebenen 20 Korrekptionsmaßnahmen angewandt wird.

Da andererseits der störende Einfluß der intrinsischen Doppelbrechung bei einem Öffnungswinkel von 45° maximal werden kann, ist es vorteilhaft, das Projektionsobjektiv so auszulegen, daß alle Öffnungswinkel der Lichtstrahlen kleiner 45° sind, insbesondere

25 kleiner gleich $\arcsin\left(\frac{NA}{n_{FK}}\right)$ sind, wobei NA die bildseitige numerische Apertur be-

zeichnet und n_{FK} die Brechzahl des Fluorid-Kristalls. Der Ausdruck $\arcsin\left(\frac{NA}{n_{FK}}\right)$ gibt

dabei den Öffnungswinkel an, welcher der bildseitigen numerischen Apertur innerhalb einer Fluorid-Kristall-Linse entspricht, wenn an der Lichtstrahl an einer planen Grenzfläche gebrochen wird. Dies wird erreicht, indem die Linsen, die nahe an der Bildebene 30 angeordnet sind, sammelnde Linsenflächen, plane Linsenflächen oder höchstens leicht

zerstreuende Linsenflächen aufweisen, wenn in Lichtrichtung nach der zerstreuenden Linsenfläche eine stärker sammelnde Linsenfläche folgt.

- Große Öffnungswinkel treten hauptsächlich bei Linsen in der Nähe von Feldebenen,
5 insbesondere der Bildebene auf. Die (100)-Linsen sollten deshalb vorzugsweise im Bereich der Feldebenen eingesetzt werden. Der Bereich, in dem die (100)- Linsen eingesetzt werden sollten, lässt sich über das Verhältnis der Linsendurchmessers zum Durchmesser der Blende bestimmen. So beträgt der Linsendurchmesser der (100)- Linsen vorzugsweise maximal 85%, insbesondere maximal 80% des Blendendurchmessers.

10

Bei Projektionsobjektiven treten die größten Öffnungswinkel in der Regel in dem der Bildebene am nächsten gelegenen Linse auf. Deshalb wird vorzugsweise bei dieser Linse die Linsenachse in Richtung der <100>-Kristallrichtung ausgerichtet.

- 15 Die intrinsische Doppelbrechung einer Fluorid-Kristall-Linse ist dabei nicht nur vom Öffnungswinkel eines Lichtstrahls, sondern auch vom Azimutwinkel des Lichtstrahls abhängig. So kann jeder Fluorid-Kristall-Linse eine Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$ zugeordnet werden, die einerseits eine Funktion des Öffnungswinkels θ_L und andererseits eine Funktion des Azimutwinkels α_L ist. Der Wert der Doppelbrechung Δn gibt
20 dabei für eine durch den Öffnungswinkel θ_L und den Azimutwinkel α_L bestimmte Strahlrichtung das Verhältnis des optischen Wegunterschied für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände zum im Fluorid-Kristall zurückgelegten physikalischen Strahlweg in der Einheit [nm/cm] an. Die intrinsische Doppelbrechung ist somit von den Strahlwegen und der Linsenform unabhängig. Den optischen Wegunterschied
25 für einen Strahl erhält man entsprechend durch Multiplikation der Doppelbrechung mit dem zurückgelegten Strahlweg. Der Öffnungswinkel θ_L wird zwischen der Strahlrichtung und der Linsenachse bestimmt, der Azimutwinkel α_L zwischen der in die zur Linsenachse senkrecht stehenden Kristallebene projizierten Strahlrichtung und einer mit der Linse fest verknüpften Bezugsrichtung.

30

Die Winkelabhängigkeit der Doppelbrechungsverteilungen der einzelnen Fluorid-Kristall-Linsen führt dazu, daß die Strahlen eines Strahlbüschels, das in der Bildebene

des Objektives auf einen Bildpunkt trifft, winkelabhängige optische Wegunterschiede $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände erfahren. Die optischen Wegunterschiede ΔOPL werden dabei in Abhängigkeit des Öffnungswinkels θ_R und des Azimutwinkel α_R angegeben. Der Öffnungswinkel θ_R eines Strahls wird

5 dabei zwischen der Strahlrichtung und der optischen Achse in der Bildebene, der Azimutwinkel α_R zwischen der in die Bildebene projizierten Strahlrichtung und einer festen Bezugsrichtung innerhalb der Bildebene bestimmt. Weist nun das Objektiv mindestens zwei Linsen oder Linsenteile aus Fluorid-Kristall auf, so ist es vorteilhaft, wenn die Linsenachsen dieser Linsen oder Linsenteile in eine Hauptkristallrichtung weisen und

10 die Linsen oder Linsenteile derart gegeneinander um die Linsenachsen verdreht angeordnet sind, daß die Verteilung $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ der optischen Wegunterschiede wesentlich reduzierte Werte im Vergleich zu einer Anordnung aufweist, bei der die Linsenachsen in die gleiche Hauptkristallrichtung weisen und die Linsen oder Linsenteile gleich orientiert eingebaut sind. Da die Doppelbrechungsverteilungen der Linsen jedoch eine

15 azimutale Abhängigkeit aufweisen, kann durch die verdrehte Anordnung der Linsen der Maximalwert der Verteilung $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ um bis zu 20%, insbesondere um bis zu 25% im Vergleich zu einem gleich orientierten Einbau reduziert werden.

Unter Linsenteilen sind beispielsweise einzelne Linsen zu verstehen, die durch An-

20 sprengen optisch nahtlos zu einer einzelnen Linse gefügt werden. Ganz allgemein bezeichnen Linsenteile die Bausteine einer einzelnen Linse, wobei die Linsenachsen der Linsenteile jeweils in Richtung der Linsenachse der einzelnen Linse weisen.

Durch den verdrehten Einbau der Fluorid-Kristall-Linsen kann insbesondere die Ab-

25 hängigkeit der Verteilung $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ vom Azimutwinkel α_R deutlich reduziert werden, so daß sich eine nahezu rotationssymmetrische Verteilung $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ ergibt.

Zeigt die Linsenachse in eine Hauptkristallrichtung, so weist die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$ der Linse eine k-zählige Azimutalsymmetrie auf. Beispielsweise

30 zeigt die Doppelbrechungsverteilung einer (100)-Linse, bei der die Linsenachse in <100>-Kristallrichtung weist, eine 4-zählige Azimutalsymmetrie, die Doppelbrechungsverteilung einer (111)-Linse, bei der die Linsenachse in <111>-Kristallrichtung

weist, eine 3-zählige Azimutalsymmetrie, und die Doppelbrechungsverteilung einer (110)-Linse, bei der die Linsenachse in <110>-Kristallrichtung weist, eine 2-zählige Azimutalsymmetrie. Je nach der Zähligkeit der Azimutalsymmetrie werden nun die einzelnen Linsen oder Linsenteile einer Gruppe um vorgegebene Drehwinkel γ gegenüber einander um die Linsenachsen verdreht angeordnet. Die Drehwinkel γ werden dabei zwischen den Bezugssichtungen von je zwei Linsen oder Linsenteilen gemessen. Für die Linsen einer Gruppe weisen die Linsenachsen in die gleiche Hauptkristallrichtung oder eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung. Die Bezugssichtungen der Linsen einer Gruppe sind so mit den Linsen verknüpft, daß die Doppelbrechungsverteilungen 10 $\Delta n(\alpha_L, \theta_0)$ für einen vorgegebenen Öffnungswinkel θ_0 den gleichen azimutalen Verlauf aufweisen. Somit treten für alle Linsen einer Gruppe die azimutalen Bereiche mit maximaler Doppelbrechung bei den gleichen Azimutwinkeln auf. Für n Linsen einer Gruppe sind die Drehwinkel zwischen je zwei Linsen folgendermaßen gegeben:

$$\gamma = \frac{360^\circ}{k \cdot n} + m \cdot \frac{360^\circ}{k} \pm 10^\circ$$

15 k gibt dabei die Zähligkeit der Azimutalsymmetrie, n die Zahl der Linsen einer Gruppe und m eine beliebige ganze Zahl an. Die Toleranz von $\pm 10^\circ$ berücksichtigt die Tatsache, daß unter Umständen die Drehwinkel von den theoretisch idealen Winkeln abweichen, um andere Randbedingungen bei der Objektivjustage berücksichtigen zu können. Eine Abweichung vom idealen Drehwinkel führt zu einem nicht optimalen azimutalen Aus-20 gleich der optischen Wegunterscheide der Linsen einer Gruppe. Dies kann jedoch in gewissen Grenzen toleriert werden.

Für (100)-Linsen ergibt sich somit folgende Vorgabe für die Drehwinkel:

$$\gamma = \frac{90^\circ}{n} + m \cdot 90^\circ \pm 10^\circ.$$

Umfasst die Gruppe zwei (100)-Linsen, so beträgt der Drehwinkel zwischen diesen bei-25 den Linsen idealerweise 45° , beziehungsweise $135^\circ, 225^\circ...$

Für (111)-Linsen ergibt sich somit folgende Vorgabe für die Drehwinkel:

$$\gamma = \frac{120^\circ}{n} + m \cdot 120^\circ \pm 10^\circ.$$

Für (110)-Linsen ergibt sich somit folgende Vorgabe für die Drehwinkel:

$$\gamma = \frac{180^\circ}{n} + m \cdot 180^\circ \pm 10^\circ.$$

Die Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL_G(\alpha_R, \theta_R)$ kann dabei aber auch für den Einfluß einer einzelnen Gruppe von Linsen angegeben werden, indem nur diese Linsen bei der Doppelbrechungsauswertung betrachtet werden und die anderen Linsen
5 als nicht doppelbrechend angenommen werden.

Die Linsen einer Gruppe werden beispielsweise dadurch bestimmt, daß ein äußerster Aperturstrahl eines Strahlenbüschels innerhalb dieser Linsen jeweils ähnliche Öffnungswinkel aufweist, wobei vorteilhafterweise die Öffnungswinkel des äußersten A-
10 perturstrahls innerhalb dieser Linsen größer 15° , insbesondere größer 20° sind. Als äußerster Aperturstrahl wird ein Strahl bezeichnet, der von einem Objektpunkt ausgeht, dessen Strahlhöhe in der Blendenebene dem Radius der Blende entspricht und der somit in der Bildebene einen Winkel gemäß der bildseitigen numerischen Apertur aufweist.
Die äußersten Aperturstrahlen werden deshalb zur Definition der Gruppen herangezo-
15 gen, weil sie üblicherweise innerhalb der Linsen die größten Öffnungswinkel aufweisen und damit die größte Störung durch die Doppelbrechung erfahren. Die Bestimmung der optischen Wegdifferenz für zwei zueinander orthogonalen linearen Polarisationszuständen für die äußersten Aperturstrahlen ermöglicht somit Aussagen über die maximale Störung einer Wellenfront durch die Doppelbrechung.

20 Weiterhin ist es vorteilhaft, wenn der äußerste Aperturstrahl in diesen Linsen jeweils einen gleichen Strahlweg zurückgelegt. Durch diese Maßnahmen ergibt sich ein guter Ausgleich der azimutalen Beiträge zur Verteilung der optischen Wegdifferenzen, die von den einzelnen Linsen einer Gruppe hervorgerufen werden, so daß die resultierende
25 Verteilung der optischen Wegdifferenzen nahezu rotationssymmetrisch ist.

Weiterhin ist es vorteilhaft, wenn der äußerste Aperturstrahl in jeder Linse einer Gruppe bei gleicher Orientierung der Linsen ähnlich große optische Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände erfährt. Ist diese Bedingung er-
30 füllt, tritt bei verdrehter Anordnung dieser Linsen ein optimaler Ausgleich der azimutalen Beiträge auf.

Im Fall von planparallelen benachbarten (100)- oder (111)-Linsen gleicher Dicke oder von vier planparallelen benachbarten (110)-Linsen gleicher Dicke erhält man eine rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede ΔOPL durch Drehung der Linsen gemäß obigen Formeln. Auch bei Linsen mit gekrümmten Oberflächen lässt sich

- 5 durch geschickte Auswahl der Linsen einer Gruppe oder durch eine entsprechende Wahl der Dicken und der Radien der Linsen bereits durch Drehen von zwei Linsen eine näherungsweise rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede erzielen. Bei (100)-Linsen oder (111)-Linsen ist es vorteilhaft, wenn eine Gruppe zwei Linsen aufweist. Bei (110)-Linsen stellt sich eine näherungsweise rotationssymmetrische Ver-
10 teilung der optischen Wegdifferenzen für vier Linsen in einer Gruppe ein.

Besonders effektiv wird die Verdrehung der Linsen dann, wenn die Linsen benachbart angeordnet sind. Besonders vorteilhaft ist es, eine Linse in zwei Teile aufzuteilen und die Linsenteile gegeneinander verdreht optisch nahtlos zu fügen, beispielsweise durch

- 15 Ansprengen.

Bei einem Projektionsobjektiv mit einer Vielzahl von Linsen ist es günstig, mehrere Gruppen von Linsen zu bilden. Dabei sind die Linsen einer Gruppe derart um die Linsenachsen verdreht angeordnet, daß die resultierende Verteilung $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ vom
20 Azimutwinkel nahezu unabhängig ist.

- Während nun die von den einzelnen Gruppen hervorgerufenen Verteilungen $\Delta OPL_G(\alpha_R, \theta_R)$ durch das gegenseitige Verdrehen der Linsen einer Gruppe nahezu unabhängig vom Azimutwinkel sind, kann der Maximalwert der Gesamtverteilung $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ des
25 gesamten Objektivs dadurch deutlich reduziert werden, daß das Projektionsobjektiv sowohl mindestens eine Gruppe mit (100)-Linsen als auch mindestens eine Gruppe mit (111)-Linsen aufweist. Eine gute Kompensation ist auch möglich, wenn innerhalb des Objektivs neben einer Gruppe mit (100)-Linsen eine Gruppe mit (110)-Linsen angeordnet ist.

30

Die Kompensation ist möglich, weil die Doppelbrechung nicht nur einen absoluten Wert, sondern auch eine Richtung aufweist. Die Kompensation des störenden Einflusses

der Doppelbrechung ist dann optimal, wenn die Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL_1(\alpha_R, \theta_R)$, welche durch die Linsen oder Linsenteile von allen Gruppen mit (100)-Linsen hervorgerufen wird, und die Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL_2(\alpha_R, \theta_R)$, welche durch die Linsen oder Linsenteile von allen Gruppen mit (111)-
5 Linsen oder (110)-Linsen hervorgerufen wird, ähnlich hohe Maximalwerte aufweist.

Eine weitere vorteilhafte Möglichkeit, den störenden Einfluß der Doppelbrechung zu reduzieren, besteht darin, ein optisches Element des Projektionsobjektivs mit einer Kompensations-Beschichtung zu belegen. Dabei geht man von der Erkenntnis aus, dass
10 jede optische Beschichtung, beispielsweise Antireflex- oder Spiegelbeschichtungen, neben ihren Eigenschaften bezüglich Reflexion und Transmission auch immer optische Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände mit sich bringen. Diese sind für s- und p-polarisiertes Licht unterschiedlich und hängen zudem vom Einfallswinkel des Strahls auf die Schicht ab. Man hat also eine einfallswinkelabhängige Doppelbrechung. Für ein Strahlbüschel, dessen Mittenstrahl mit Inzidenzwinkel 0° auf die Kompensations-Beschichtung trifft, sind die Doppelbrechungs-
15 Werte und -Richtungen rotationssymmetrisch bezüglich des Mittenstrahls. Die Kompensations-Beschichtung ist nun so aufgebaut, daß sie bezüglich des Betrags der Doppelbrechung ein vorgegebenes Verhalten als Funktion des Öffnungswinkels der Strahlen
20 eines Strahlbüschels zeigt.

Dabei bestimmt man zunächst die Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände für ein Strahlbüschel in der Bildebene des Projektionsobjektivs. Der Öffnungswinkel θ_R eines
25 Strahls wird dabei zwischen der Strahlrichtung und der optischen Achse in der Bildebene, der Azimutwinkel α_R zwischen der in die Bildebene projizierten Strahlrichtung und einer festen Bezugsrichtung innerhalb der Bildebene bestimmt. Die Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände beschreibt dabei alle Einflüsse durch intrinsische Doppelbrechung von
30 Fluorid-Kristall-Linsen, Spannungsdoppelbrechung, Belegung der optischen Elemente mit Antireflex-Schichten von Linsen oder Spiegelschichten.

- Aus der Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ wird die effektive Doppelbrechungsverteilung der Kompensations-Beschichtung bestimmt, welche auf ein optisches Element mit einer Elementachse aufgebracht wird. Als optische Elemente werden beispielsweise refraktive oder diffraktive Linsen, Planplatten oder Spiegel eingesetzt. Die optischen Flächen des optischen Elements sind durch die optisch genutzten Bereiche, also in der Regel Vorder- und Rückfläche gegeben. Die Elementachse ist beispielsweise durch eine Symmetriearchse einer rotationssymmetrischen Linse gegeben. Weist die Linse keine Symmetriearchse auf, so kann die Elementachse durch die Mitte eines einfallenden Strahlbündels oder durch eine Gerade gegeben sein, bezüglich der die Strahlwinkel aller Lichtstrahlen innerhalb der Linse minimal sind. Die effektiven Doppelbrechungswerte hängen von Azimutwinkeln α_F , welche auf eine zur Elementachse senkrecht stehende Bezugsrichtung bezogen sind, und von Öffnungswinkeln θ_F , welche auch die Elementachse bezogen sind, ab.
- Einem Wertepaar (α_R, θ_R) eines Strahls in der Bildebene entspricht dabei ein Wertepaar (α_F, θ_F) am optischen Element.

Die effektive Doppelbrechungsverteilung der Kompensations-Beschichtung wird nun so bestimmt, dass die Verteilung der optischen Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände für das gesamte System inklusive Kompensations-Beschichtung wesentlich reduziert sind gegenüber der Verteilung ohne die Kompensations-Beschichtung.

Die effektive Doppelbrechungsverteilung lässt sich durch die Materialwahl, die Dickenverläufe und die Aufdampfwinkel für die einzelnen Schichten der Kompensations-Beschichtung beeinflussen. Das Schichtdesign und die Prozessparameter ergeben sich dabei durch Anwendung von Schichtdesign-Computer-Programmen, welche aus der effektiven Doppelbrechungsverteilung, der Vorgabe der Materialien und der Geometrie des optischen Elements die Dickenverläufe der einzelnen Schichten und die Prozessgrößen bestimmt.

Die Kompensations-Beschichtung kann dabei auch auf mehreren optischen Elementen angebracht werden. Dies erhöht die Freiheitsgrade bei der Bestimmung der Kompensations-Schichten, die neben der Kompensation auch eine hohe Transmission der Beschichtung gewährleisten sollten.

5

Typische Verteilungen der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände weisen für den Öffnungswinkel $\theta_R=0^\circ$ geringe Wegunterschiede auf. Deshalb ist es günstig, wenn die doppelbrechende Wirkung der Kompensations-Beschichtung für den Öffnungswinkel $\theta_F=0^\circ$ nahezu verschwindet. Dies erreicht man, wenn man bei der Herstellung der Kompensations-Beschichtung keine hohen Aufdampfwinkel zum Einsatz kommen. Vorteilhaft weist deshalb die optische Fläche des optischen Elements, auf das die Kompensations-Beschichtung aufgebracht wird, eine möglichst geringe Krümmung auf.

- 10 15 Es ist auch möglich, dass die Kompensationsbeschichtung eine Doppelbrechungsverteilung mit örtlich variierender Doppelbrechung hat, so dass Bereiche mit mehr oder weniger Phasenaufspaltung erzeugt werden. Die Variation der Doppelbrechung umfasst hier sowohl Variationen beim Absolutwert der Phasenaufspaltung, als auch Variationen bei der Richtung, also eine Richtungsabhängigkeit, die z.B. durch die Ausrichtung der
20 Hauptachsen gegeben ist, die die doppelbrechende Wirkung beschreiben. Die Doppelbrechungsverteilung kann beispielsweise rotationssymmetrisch zu einer Elementachse des mit der Beschichtung belegten Elementes sein. Hierbei kann beispielsweise eine in Radialrichtung, also von der Mitte zum Rand des optischen Elementes definiert zunehmende oder abnehmende Doppelbrechung vorgesehen sein. Durch eine gezielte Steuerung der radialen Doppelbrechungsverteilung kann die Kompensationswirkung optimal an verschiedene Flächenkrümmungen der belegten Flächen angepasst werden.

25 Es ist auch möglich, dass die Doppelbrechungsverteilung nicht-rotationssymmetrisch ist. Sie kann beispielsweise eine azimutale Modulation der Stärke der Doppelbrechung aufweisen, insbesondere mit einer Doppelbrechungsverteilung, die in Bezug auf die Elementachse eine mehrzählige Radialsymmetrie aufweist, insbesondere eine 2-zählige, 3-zählige, 4-zählige oder 6-zählige Symmetrie. Hierdurch kann beispielsweise eine a-

zimutale Modulation der Doppelbrechungseigenschaften eines intrinsische Doppelbrechung aufweisenden Substrats mindestens teilweise kompensiert werden, beispielsweise eines Substrates aus <110>, <111> oder <100> – orientierter Fluorideinkristall.

- 5 Eine Beschichtung mindestens einer optischen Fläche einer optischen Komponente eines optischen Systemes kann auch als anisotrope Beschichtung ausgebildet sein und beispielsweise als Kompensationsbeschichtung dienen. Elemente mit „anisotroper“ Beschichtung können unabhängig von den sonstigen Merkmalen der Erfindung nützlich sein und werden unten näher erläutert.

10

Durch das gegeneinander Verdrehen von Linsen mit (100)- oder (111)-Orientierung erhält man wie oben beschrieben näherungsweise eine rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ in der Bildebene, welche nur vom Öffnungswinkel θ_R abhängt. Die optischen Wegunterschiede können mit der Kompensations-Beschichtung eines optischen Elements noch weiter reduziert werden, deren effektive Doppelbrechungsverteilung primär nur vom Öffnungswinkel θ_F abhängt. Dies wird erreicht, indem die Schichtdicken der einzelnen Schichten der Kompensations-Beschichtung über das optische Element homogen sind und keine Dickenverläufe aufweisen.

15

Vorteilhaft lässt sich die Erfindung einsetzen, indem man das optische Element mit der Kompensationsbeschichtung als austauschbares Element gestaltet.

20

Vorteilhaft wird dabei das der Bildebene am nächsten gelegene optische Element verwendet.

25

Das Verfahren sieht dabei vor, dass in einem ersten Schritt Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände für ein Strahlbüschel in der Bildebene bestimmt wird. Dabei wird der Einfluß von allen optischen Elementen des Objektivs inklusive Beschichtungen berücksichtigt.

30 Das optische Element, das in einem nachfolgenden Schritt mit der Kompensationsbeschichtung belegt wird, ist dabei ebenfalls im Strahlengang des Strahlbüschels.

In einem zweiten Schritt wird mit dem bereits beschriebenen Verfahren die effektive Doppelbrechungsverteilung einer Kompensations-Beschichtung und die daraus resultierenden Dickenverläufe der einzelnen Schichten und die Prozessparameter zur Herstellung der einzelnen Schichten bestimmt.

- 5 In einem dritten Schritt wird das optische Element aus dem Strahlengang entfernt und mit der Kompensations-Beschichtung belegt. Falls die optische Fläche des optischen Elements bereits belegt war, wird diese Schicht vor der erneuten Belegung entfernt.
In einem vierten Schritt wird das optische Element mit der Kompensations-Beschichtung wieder an dem ursprünglichen Ort innerhalb des Objektivs angebracht.

10

Als Material für die Linsen wird in Projektionsobjektiven vorzugsweise Kalzium-Fluorid eingesetzt, da Kalzium-Fluorid bei gemeinsamem Einsatz mit Quarz bei einer Arbeitswellenlängen von 193nm sich zur Farbkorrektur besonders eignet, beziehungsweise bei einer Arbeitswellenlänge von 157nm eine ausreichende Transmission bereitstellt. Aber auch für die Fluorid-Kristalle Strontium-Fluorid oder Barium-Fluorid gelten die hier getroffenen Aussagen, da es sich um Kristalle vom gleichen kubischen Kristall-Typ handelt.

Der störende Einfluss der intrinsische Doppelbrechung macht sich besonders dann 20 merkbar, wenn die Lichtstrahlen innerhalb der Linsen große Öffnungswinkel aufweisen. Dies ist für Projektionsobjektive der Fall, die eine bildseitige numerische Apertur aufweisen, die größer als 0.7, insbesondere größer 0.8 ist.

Die intrinsische Doppelbrechung nimmt mit abnehmender Arbeitswellenlänge deutlich 25 zu. So ist die intrinsische Doppelbrechung bei einer Wellenlänge von 193nm mehr als doppelt so groß, bei einer Wellenlänge von 157nm mehr als fünfmal so groß wie bei einer Wellenlänge von 248nm. Die Erfindung lässt sich deshalb besonders dann vorteilhaft einsetzen, wenn die Lichtstrahlen Wellenlängen kleiner 200nm, insbesondere kleiner 160nm aufweisen.

30

Bei dem Objektiv kann es sich dabei um ein rein refraktives Projektionsobjektiv handeln, das aus einer Vielzahl von rotationssymmetrisch um die optische Achse angeord-

neten Linsen besteht, oder um ein Projektionsobjektiv vom katadioptrischen Objektivtyp.

- Derartige Projektionsobjektive lassen sich vorteilhaft in Mikrolithographie-
- 5 Projektionsbelichtungsanlagen einsetzen, die ausgehend von der Lichtquelle ein Beleuchtungssystem, ein Masken-Positioniersystem, eine Struktur tragende Maske, ein Projektionsobjektiv, ein Objekt-Positionierungssystem und ein Licht empfindliches Substrat umfassen.
- 10 Mit dieser Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage lassen sich mikrostrukturierte Halbleiter-Bauelemente herstellen.

Die Erfindung stellt auch ein geeignetes Verfahren zur Herstellung von Objektiven bereit. Gemäß dem Verfahren werden Linsen oder Linsenteile aus Fluorid-Kristall, deren
15 Linsenachsen in eine Hauptkristallrichtung weisen, derart um die Linsenachsen verdreht angeordnet, daß die Verteilung $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ wesentlich reduzierte Werte aufweist im Vergleich zu einer Linsenanordnung, bei der die Linsenachsen der Fluorid-kristall-Linsen in die gleiche Hauptkristallrichtung weisen und bei der die Linsen gleich orientiert angeordnet sind.

- 20 Das Verfahren sieht weiterhin vor, Gruppen mit (100)-Linsen und mit (111)-Linsen oder (110)-Linsen zu bilden und diese parallel einzusetzen. Das Verfahren wird dabei beispielsweise bei einem Projektionsobjektiv angewandt, das mindestens zwei Fluorid-Kristall-Linsen in <100>-Orientierung und mindestens zwei Linsen in <111>-
25 Orientierung umfasst. Von diesen Linsen ist dabei weiterhin die Lage der Bezugsrichtungen bekannt. Das Verfahren nutzt dabei die erforderliche Erkenntnis aus, daß sich durch Drehen der Fluorid- Kristall-Linsen um die optische Achse die Maximalwerte der Verteilung $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ der optischen Wegunterschiede wesentlich reduzieren lassen.
Durch geeignete Simulationsmethoden wird dabei ein von einem Objektpunkt ausgehendes Strahlenbüschel durch ein Projektionsobjektiv propagiert und auf Grund der
30 bekannten optischen Eigenschaften der Fluorid-Kristall-Linsen die Verteilung $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ in der Bildebene bestimmt. In einem Optimierungsschritt werden nun die

Drehwinkel zwischen den Fluorid-Kristall-Linsen so lange geändert, bis die Doppelbrechung tolerierbare Werte aufweist. Der Optimierungsschritt kann dabei auch weitere Randbedingungen wie beispielsweise die Kompensation von nicht rotationssymmetrischen Linsenfehlern durch Linsendrehen berücksichtigen. Durch diesen Optimierungsschritt kann der Maximalwert der Verteilung $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ um bis zu 30%, insbesondere bis zu 50% reduziert werden im Vergleich zu einem Projektionsobjektiv, bei dem die Fluorid-Kristall-Linsen gleich orientiert angeordnet sind. Das Optimierungsverfahren kann auch einen Zwischenschritt aufweisen. In diesem Zwischenschritt werden aus den Fluorid-Kristall-Linsen Gruppen mit Linsen, wobei die Linsen einer Gruppe für einen äußersten Aperturstrahl bei gleich orientierter Anordnung der Linsen einen ähnlichen optischen Wegunterschied zwischen zwei zueinander orthogonalen linearen Polarisationszuständen erzeugen. In dem nachfolgenden Optimierungsschritt werden dann die Linsen nur innerhalb der Gruppen gedreht, um die optischen Wegunterschiede zu reduzieren. So lassen sich zunächst die (100)-Linsen derart drehen, daß die durch die (100)-Linsen hervorgerufenen optischen Wegunterschiede reduziert werden, und dann die (111)-Linsen derart drehen, daß die durch die (111)-Linsen hervorgerufenen optischen Wegunterschiede reduziert werden. Die Verteilung der Fluorid-Kristall-Linsen auf Linsen mit (100)-Orientierung und (111)-Orientierung muß bei der Optimierung so erfolgen, daß sich die resultierende (100)-Verteilung $\Delta OPL_{100}(\alpha_R, \theta_R)$ und die resultierende (111)-Verteilung $\Delta OPL_{111}(\alpha_R, \theta_R)$ weitgehend kompensieren. Entsprechendes gilt auch für den parallelen Einsatz von (100)-Linsen und (110)-Linsen.

Die Erfindung betrifft auch ein Herstellverfahren für eine Linse, bei dem in einem ersten Schritt mehrere Platten aus Fluorid-Kristall optisch nahtlos zu einem Blank gefügt werden, und in einem zweiten Schritt die Linse aus dem Blank durch bekannte Herstellmethoden herausgearbeitet wird. Die Platten werden dabei wie zuvor für Linsen oder Linsenteile beschrieben, zueinander um die Flächennormalen verdreht angeordnet.

Platten, deren Flächennormalen in die gleiche Hauptkristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen, haben vorteilhafterweise die gleiche axiale Dicke.

Werden (100)-Platten mit (111)-Platten optisch nahtlos gefügt, so sollte das Verhältnis der Summe der Dicken der (111)-Platten zu der Summe der Dicken der (100)-Platten = 1.5 ± 0.2 betragen.

- 5 Werden (100)-Platten mit (110)-Platten optisch nahtlos gefügt, so sollte das Verhältnis der Summe der Dicken der (110)-Platten zu der Summe der Dicken der (100)-Platten = 4.0 ± 0.4 betragen.

Die Erfindung betrifft auch optische Komponenten mit mindestens einer „anisotropen“
10 Beschichtung. Insbesondere kann eine Beschichtung mindestens einer optischen Fläche einer optischen Komponente eines optischen Systemes als anisotrope Beschichtung ausgebildet sein und beispielsweise als Kompensationsbeschichtung dienen. Eine „anisotrope“ Beschichtung im Sinne dieser Anmeldung ist eine Beschichtung, die eine ausgeprägte Richtungsabhängigkeit ihrer optischen Wirkung von der Richtung der elektrischen
15 Feldvektoren der auftreffenden Strahlung in der Auftrefffläche zeigt. Eine anisotrope Beschichtung kann somit in einen betrachteten Bereich eine schnelle oder eine langsamen Achse haben, die einer Vorzugsrichtung der Beschichtung entspricht.

Anisotrope dünne Filme mit speziellen, durch die Herstellungsbedingungen beeinflussten
20 Mikrostrukturen und dadurch bedingten anisotropen Eigenschaften sind an sich bekannt. Der Artikel „Play the angles to create exotic thin films“ von M. Seto und M. Brett in: Vacuum Solutions, March/April 2000, Seiten 26 – 31, beschreibt die Morphologie verschiedener dünner Filme, die durch Bedampfung unter hohen Aufdampfwinkeleinen (glancing angle deposition, GLAD) erzeugt werden können. Solche porösen dünnen Filme, die häufig columnare Strukturen mit von den Beschichtungsrichtung abhängigen Merkmalen aufweisen, können auch für optische Anwendungen nützlich sein.
25 Beispiel für Polarisationselemente dieser Art sind unter anderem in dem Artikel „Review of birefringent and chiral optical interference coatings“ von I. Hodgkinson und Q. H. Wu in OIC 2000/2001, Seiten 1 und 2 oder in „Birefringent Thin Film Polarizing Elements“, von I. Hodgkinson und Q. H. Wu, World Scientific, Singapore, New Jersey, London, Hong Kong, ISBN 981-02-2906-2 angegeben, deren Inhalt durch Bezugnahme
30 zum Inhalt dieser Beschreibung gemacht wird.

Für eine Kompensation besonders geeignet sind anisotrope Beschichtungen mit einer örtlicher Variation der Anisotropie. Die Variation kann die Richtung der Vorzugsrichtung und/oder den Absolutbetrag der durch die Beschichtung erzeugten Phasenaufspaltung umfassen.

Zur Herstellung von Beschichtungen mit einer Doppelbrechungverteilung mit einer örtlich variiierenden Doppelbrechung können alle bekannten Beschichtungsverfahren bei geeigneter Modifikation der Verfahrensführung eingesetzt werden, insbesondere PVD-Verfahren, wie das Elektronenstrahlverdampfen, oder Sputtering. Bei der Erzeugung von mindestens bereichsweise anisotropen Beschichtungen wird bei einer bevorzugten Ausführungsform das Beschichtungsmaterial auf mindestens einen Bereich der Substratoberfläche oder einer bereits vorhandene Beschichtung unter einem Belegungswinkel, insbesondere Aufdampfwinkel, aufgebracht, der so groß ist, dass eine anisotrope Beschichtungsstruktur entsteht. Hierzu kann beispielsweise, ausgehend von bekannten Bedampfungsanlagen, der Höhenabstand zwischen einer Materialquelle und den Substraten deutlich verkleinert werden, um eine schräge Aufdampfung von Beschichtungsmaterial zu erreichen, bei denen typische Aufdampfungswinkel im Bereich 30° bis 40° oder mehr liegen können. Als Aufdampfungswinkel (Belegungswinkel) wird hier der Winkel zwischen der Auftreffrichtung von Beschichtungsmaterial auf die Substratoberfläche und der Flächennormalen der Substratoberfläche am Beschichtungsort verstanden.

Es hat sich gezeigt, dass es durch geeignete Modifikationen bekannter Blendenverfahren möglich ist, auf flachen, schwach oder stark gekrümmten optischen Substraten anisotrope Beschichtungen mit einer definierten Verteilung ihrer Doppelbrechungseigenschaften, insbesondere mit einer definierten Verteilung der Schichtanisotropie herzustellen. Bei einer Variante werden zur Steuerung der Doppelbrechungverteilung und/oder der Anisotropie der Beschichtung folgende Schritte durchgeführt. Es wird eine Rotation des Substrats um eine Substratdrehachse erzeugt. Hierzu wird vorzugsweise ein Planetensystem verwendet, bei dem jedes Substrat an einem Substratträger angeordnet ist, der eine Eigendrehung um seine Substratdrehachse und eine globale Drehung um eine

Hauptrotationsachse des Planetensystems ausführt. In dieser Anlage wird nun die Substratoberfläche mit dem Material einer Materialquelle unter großen Beschichtungswinkeln beschichtet. Dabei erfolgt eine zeitweise Abschattung des Beschichtungsmaterials während der Rotation des Substrates zur Erzeugung einer von der Radialposition des

5 Beschichtungsortes abhängigen Beschichtungszeit gemäß einem vorgegebenen radialen Zeitprofil. Dabei kann die Abschattung durch ein oder mehrere Blende so durchgeführt werden, dass kleine Beschichtungswinkel (z.B. < 30° bis 35°) abgeschattet werden, so dass das Material ausschließlich oder zumindest überwiegend unter sehr großen Aufdampfwinkeln (z.B. 40° oder mehr) unter ausgewählten Richtungen auf die Substrat-

10 oberfläche trifft. Durch geeignete Formgebung der Blenden können beliebige radial-symmetrische Verläufe der Doppelbrechungverteilung mit unterschiedlichen Anisotropiegraden erzeugt werden.

Die Erfindung betrifft auch ein Verfahren zur Herstellung eines polarisatoroptischen Elementes, d.h. einer optischen Komponente oder Anordnung mit einer definierten Wirkung auf den Polarisationszustand der auftreffenden Strahlung, das auch unabhängig von den sonstigen Merkmalen der Erfindung nützlich und schutzfähig sein kann. Das polarisationsoptische Element kann z.B. ein Verzögerungselement (Retarder) sein. Das Verfahren sieht eine Veränderung der örtlichen Doppelbrechungverteilung einer

20 Beschichtung nach Abschluss des Beschichtungsvorganges vor. Diese Veränderung kann durch lokale Beaufschlagung der fertigen Beschichtung mit einer zur Veränderung der Morphologie der Beschichtung geeigneten Energie gemäß einer vorgegebenen räumlichen Verteilung durchgeführt werden. Eine nachträgliche lokale Veränderung der Schichteigenschaften kann bei Interferenzschichtsystemen aller Art (z.B. Reflexschichten, Antireflexschichten) vorgesehen sein. Sie ist besonders wirksam bei anisotropen Beschichtungen, da die für die Anisotropie verantwortlichen Morphologien typischerweise Nichtgleichgewichtsstrukturen mit begrenzter Stabilität sind. Die Festlegung der mit Energie zur beaufschlagenden Bereiche kann beispielsweise mit Hilfe einer oder mehrerer Masken erfolgen. Insbesondere kann die Morphologie einer Beschichtung

25 durch thermische Einwirkung verändert werden. Das ist beispielsweise durch Bestrahlung mit einem Infrarot-Laser oder einer anderen, ausreichend Wärmeenergie erzeugenden Bestrahlungsart möglich. Auch eine ggf. schreibende Bearbeitung mit einem Elekt-

30

ronenstrahl ist möglich. Alternativ oder zusätzlich zu einem thermischen Energieeintrag kann die Energie auch mechanisch aufgebracht werden, beispielsweise mit Hilfe von Ionenstrahlen und/oder Heizstempeln. Die nachträgliche Bearbeitung der Schichtstruktur erlaubt es als besonderen Vorteil, nicht-rotationssymmetrische Doppelbrechungverteilungen einzustellen, wobei gegebenenfalls eine sehr kleinräumige Einstellung von Eigenschaften möglich ist, z.B. mit typischen Bereichsgrößem im mm- oder cm-Bereich.

Beispielsweise können bei niedrigen Beschichtungstemperaturen (kalt) aufgedampfte Schichten, insbesondere anisotrope Schichtsysteme, durch Laserbestrahlung lokal in ihren Doppelbrechungeigenschaften verändert werden. Auf diese Weise kann ein Polarisationsfilter mit gezielter örtlicher Modulation der Phasenaufspaltung erzeugt werden.

Die nachträgliche Veränderung der Doppelbrechungsverteilung erlaubt es auch, an fertig montierten optischen Systemen, beispielsweise Projektionsobjektiven für die Mikrolithografie, gezielt Änderungen ihres polarisationsoptischen Verhaltens vorzunehmen. Hierzu kann das optische System zunächst unter Verwendung mindestens einer Komponente mit einer anisotropen Beschichtung oder einer anderen Nichtgleichgewichtsbeschichtung zusammengebaut und vermessen werden. Aus dem Messergebnis kann eine gewünschte effektive Doppelbrechungverteilung der mindestens eine Kompensations-Beschichtung ermittelt werden, die erforderlich ist, um das System polarisationsoptisch abzustimmen. Dann kann das mit der Beschichtung versehene optische Element ausgebaut werden, um die nachträglichen Veränderungen der Schichteigenschaften lokal durch geeigneten Energieeintrag vorzunehmen. Nach Einbau des auf diese Weise veränderten optischen Elementes hat dann das optische System die gewünschten Eigenschaften. Die Erfindung betrifft somit auch ein besonderes Herstellverfahren für ein optisches System, insbesondere ein optisches System für die Mikrolithographie.

Näher erläutert wird die Erfindung anhand der Zeichnungen.

30 Fig. 1 zeigt einen Schnitt durch einen Fluorid-Kristall-Block senkrecht zu den {100}-Kristallebenen zusammen mit einer Linse eines Projektionsobjektives in schematischer Darstellung;

Fig. 2A-C zeigen je eine planparallele (100)-, (111)- und (110)-Linse in einer schematischen dreidimensionalen Darstellung;

5 Fig. 3 zeigt ein Koordinatensystem zur Definition des Öffnungswinkels und des Azimutwinkels;

Fig. 4A-F zeigen die Doppelbrechungsverteilung für (100)-Linsen in verschiedenen
Darstellungen, sowie die Doppelbrechungsverteilung für zwei gegeneinander
10 um 45° verdrehte (100)-Linsen;

Fig. 5A-F zeigen die Doppelbrechungsverteilung für (111)-Linsen in verschiedenen
Darstellungen, sowie die Doppelbrechungsverteilung für zwei gegeneinander
um 60° verdrehte (111)-Linsen;

15 Figur 6A-G zeigen die Doppelbrechungsverteilung für (111)-Linsen in verschiedenen
Darstellungen, sowie die Doppelbrechungsverteilung für zwei gegeneinander
um 90° verdrehte (110)-Linsen, beziehungsweise für vier gegeneinander um
 45° verdrehte (110)-Linsen;

20 Figur 7 zeigt den Linsenschnitt eines refraktiven Projektionsobjektivs;

Figur 8 zeigt den Linsenschnitt eines katadioptrischen Projektionsobjektivs;

25 Figur 9 zeigt eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage in schematischer
Darstellung;

Fig. 10 ist ein Diagramm, das für eine homogene und für eine anisotrope Kompensa-
tionsbeschichtung die Abhängigkeit der durch Doppelbrechung verursachten
30 Phasenaufspaltung ΔPH von der Einstrahlrichtung zeigt;

Fig. 11 ist ein Diagramm, das die Abhängigkeit der durch Doppelbrechung verursachten Phasenaufspaltung $\Delta\Phi$ von der Einstrahlrichtung für Schichten mit unterschiedlichen Anzahlen von Einzelschichten und unterschiedlichen Herstellungsbedingungen zeigt;

5

Fig. 12 zeigt schematisch die Herstellung einer anisotropen Beschichtung auf einer Linse in einer Beschichtungsanlage mit Planetensystem;

Fig. 13 zeigt schematisch Abschattungsgeometrien für die Beschichtungsherstellung

10 mit Hilfe von Abschattungsblenden; und

Fig 14 zeigt schematisch ein Herstellverfahren für einen Polarisator mit einer nachträglichen Veränderung der Eigenschaften einer anisotropen Beschichtung.

15 Figur 1 zeigt schematisch einen Schnitt durch einen Fluorid-Kristall-Block 3. Der Schnitt ist so gewählt, daß die {100}-Kristallebenen 5 als einzelne Linien zu sehen sind, so daß die {100}-Kristallebenen 5 sich senkrecht zur Papierebene befinden. Der Fluorid-Kristall-Block 3 dient als Blank oder Ausgangsmaterial für die (100)-Linse 1. In diesem Beispiel ist die (100)-Linse 1 eine Bikonvex-Linse mit der Linsenachse EA, die
20 zugleich Symmetriearchse der Linse ist. Die Linse 1 wird nun so aus dem Fluorid-Kristall-Block herausgearbeitet, daß die Linsenachse EA senkrecht auf den {100}-Kristallebenen steht.

In Figur 2A wird mit einer dreidimensionalen Darstellung veranschaulicht, wie die
25 intrinsische Doppelbrechung mit den Kristallrichtungen zusammenhängt, wenn die Linsenachse EA in <100>-Kristallrichtung weist. Dargestellt ist eine kreisrunde planparallele Platte 201 aus Kalzium-Fluorid. Die Linsenachse EA zeigt dabei in <100>-Kristallrichtung. Neben der <100>-Kristallrichtung sind auch die <101>-, <1 $\bar{1}$ 0>-, <10 $\bar{1}$ >- und <110>-Kristallrichtungen als Pfeile dargestellt. Die intrinsische Doppelbrechung ist schematisch durch vier "Keulen" 203 dargestellt, deren Oberflächen den Betrag der intrinsischen Doppelbrechung für die jeweilige Strahlrichtung eines Lichtstrahls angeben. Die maximale intrinsische Doppelbrechung ergibt sich in den <101>-,
30

<1 $\bar{1}$ 0>, <10 $\bar{1}$ > und <110>- Kristallrichtungen, also für Lichtstrahlen mit einem Öffnungswinkel von 45° und einem Azimutwinkel von 0°, 90°, 180° und 270° innerhalb der Linse. Für Azimutwinkel von 45°, 135°, 225° und 315° ergeben sich minimale Werte der intrinsischen Doppelbrechung. Für einen Öffnungswinkel von 0° verschwindet die intrinsische Doppelbrechung.

In Figur 2B wird mit einer dreidimensionalen Darstellung veranschaulicht, wie die intrinsische Doppelbrechung mit den Kristallrichtungen zusammenhängt, wenn die Linsenachse EA in <111>-Kristallrichtung weist. Dargestellt ist eine kreisrunde planparallele Platte 205 aus Kalzium-Fluorid. Die Linsenachse EA zeigt dabei in <111>-Kristallrichtung. Neben der <111>-Kristallrichtung sind auch die <011>, <101> und <110>-Kristallrichtungen als Pfeile dargestellt. Die intrinsische Doppelbrechung ist schematisch durch drei "Keulen" 207 dargestellt, deren Oberflächen den Betrag der intrinsischen Doppelbrechung für die jeweilige Strahlrichtung eines Lichtstrahls angeben. Die maximale intrinsische Doppelbrechung ergibt sich jeweils in den <011>, <101> und <110>- Kristallrichtungen, also für Lichtstrahlen mit einem Öffnungswinkel von 35° und einem Azimutwinkel von 0°, 120° und 240° innerhalb der Linse. Für Azimutwinkel von 60°, 180° und 300° ergeben sich jeweils minimale Werte der intrinsischen Doppelbrechung. Für einen Öffnungswinkel von 0° verschwindet die intrinsische Doppelbrechung.

In Figur 2C wird mit einer dreidimensionalen Darstellung veranschaulicht, wie die intrinsische Doppelbrechung mit den Kristallrichtungen zusammenhängt, wenn die Linsenachse EA in <110>-Kristallrichtung weist. Dargestellt ist eine kreisrunde planparallele Platte 209 aus Kalzium-Fluorid. Die Linsenachse EA zeigt dabei in <110>-Kristallrichtung. Neben der <110>-Kristallrichtung sind auch die <01 $\bar{1}$ >, die <10 $\bar{1}$ >, die <101> und die <011>-Kristallrichtungen als Pfeile dargestellt. Die intrinsische Doppelbrechung ist schematisch durch fünf "Keulen" 211 dargestellt, deren Oberflächen den Betrag der intrinsischen Doppelbrechung für die jeweilige Strahlrichtung eines Lichtstrahls angeben. Die maximale intrinsische Doppelbrechung ergibt sich zum einen in Richtung der Linsenachse EA, und zum anderen jeweils in der <01 $\bar{1}$ >, <10 $\bar{1}$ >, <101> und <011>-Kristallrichtung, also für Lichtstrahlen mit einem Öffnungswinkel

von 0° , beziehungsweise mit einem Öffnungswinkel von 60° und den vier Azimutwinkeln, die sich durch Projektion der $<01\bar{1}>$ -, $<10\bar{1}>$ -, $<101>$ - und $<011>$ -Kristallrichtungen in die $\{110\}$ -Kristallebene ergeben. Derartig hohe Öffnungswinkel treten in Kristallmaterial jedoch nicht auf, da die maximalen Öffnungswinkel durch die 5 Brechzahl des Kristalls auf kleiner 45° beschränkt sind.

Die Definition von Öffnungswinkel θ und Azimutwinkel α ist in Figur 3 dargestellt. Für die (100) -Linse von Figur 2 zeigt die z-Achse in $<100>$ -Kristallrichtung, die x-Achse in die Richtung, die sich durch Projektion der $<110>$ -Kristallrichtung in die $\{100\}$ -10 Kristallebene ergibt. Die z-Achse ist dabei gleich der Linsenachse und die x-Achse gleich der Bezugsrichtung.

Aus der zitierten Internetpublikation ist bekannt, daß Messungen bei Strahlausbreitung in der $<110>$ -Kristallrichtung einen Doppelbrechungswert von (6.5 ± 0.4) nm/cm bei 15 einer Wellenlänge von $\lambda = 156.1$ nm für Kalzium-Fluorid ergeben haben. Mit diesem Messwert als Normierungsgröße kann die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$ einer Kalzium-Fluorid-Linse in Abhängigkeit der Kristallorientierung theoretisch abgeleitet werden. Dazu werden die aus der Kristallopptik bekannten Formalismen zur Berechnung der Indexellipsoide in Abhängigkeit der Strahlrichtung herangezogen. Die theoretischen 20 Grundlagen sind beispielsweise im „Lexikon der Optik“, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg Berlin, 1999 unter dem Stichwort „Kristallopptik“ zu finden.

Neuere Messungen der Anmelderin haben ergeben, daß bei Strahlausbreitung in der $<110>$ -Kristallrichtung die intrinsische Doppelbrechung 11 nm/cm in Kalzium-Fluorid-25 Kristall bei einer Wellenlänge von $\lambda = 156.1$ nm beträgt. Die im folgenden für die Normierungsgröße $\Delta n_{max} = 6,5$ nm/cm getroffenen Aussagen können ohne Schwierigkeiten auf die Normierungsgröße $\Delta n_{max} = 11$ nm/cm umgerechnet werden.

30 In Figur 4A ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Öffnungswinkels θ für den Azimutwinkel $\alpha = 0^\circ$ für eine (100) -Linse dargestellt. Der Wert für die intrinsische Doppelbrechung von 6.5 nm/cm bei dem Öffnungswinkel $\theta = 45^\circ$

entspricht dem Messwert. Der Kurvenverlauf wurde gemäß den aus der Kristallographie bekannten Formeln bestimmt.

In Figur 4B ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Azimutwinkels α für den Öffnungswinkel $\theta = 45^\circ$ für eine (100)-Linse dargestellt. Die vierzählige Azimutalsymmetrie ist offensichtlich.

In Figur 4C ist die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$ für einzelne Strahlrichtungen im (θ, α) -Winkelraum für eine (100)-Linse dargestellt. Jede Linie repräsentiert Betrag und Richtung für eine durch den Öffnungswinkel θ und den Azimutwinkel α definierte Strahlrichtung. Die Länge der Linien ist proportional zum Betrag der Doppelbrechung, beziehungsweise der Differenz der Hauptachsenlängen der Schnittellipse, während die Richtung der Linien die Orientierung der längeren Hauptachse der Schnittellipse angibt. Die Schnittellipse erhält man, indem man das Indexellipsoid für den Strahl der Richtung (θ, α) mit einer Ebene schneidet, die senkrecht auf der Strahlrichtung steht und durch die Mitte des Indexellipsoide geht. Sowohl die Richtungen als auch die Längen der Linien zeigen die Vierzähligkeit der Verteilung. Die Länge der Linien und damit die Doppelbrechung ist bei den Azimutwinkeln $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ und 270° maximal.

Figur 4D zeigt nun die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$, die sich ergibt, wenn zwei benachbarte planparallele (100)-Linsen gleicher Dicke um 45° gedreht angeordnet werden. Die resultierende Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$ ist unabhängig vom Azimutwinkel α . Die längeren Hauptachsen der Schnittellipsen verlaufen tangential. Die resultierenden optischen Wegunterschiede zweier zueinander orthogonaler Polarisationszustände erhält man, indem man die Doppelbrechungswerte mit den physikalischen Wegeängen der Strahlen innerhalb der planparallelen (100)-Linsen multipliziert. Rotationssymmetrische Doppelbrechungsverteilungen erhält man, wenn man n planparallele (100)-Linsen gleicher Dicke derart anordnet, daß für die Drehwinkel β zwischen je zwei Linsen gilt: $\beta = \frac{90^\circ}{n} + m \cdot 90^\circ \pm 5^\circ$,

wobei n die Anzahl der planparallelen (100)-Linsen angibt und m eine ganze Zahl ist. Im Vergleich zu einer gleichorientierten Anordnung der Linsen kann der maximale

Wert der Doppelbrechung für den Öffnungswinkel $\theta = 30^\circ$ um 30% reduziert werden.

Eine nahezu rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände ergibt sich auch für beliebige Linsen, wenn alle Strahlen eines Strahlbüschels in den Linsen jeweils ähnlich große Winkel

- 5 aufweisen und ähnlich große Weglängen innerhalb der Linsen zurücklegen. Die Linsen sollten deshalb so zu Gruppen zusammengefaßt werden, daß die Strahlen die zuvor angegebene Bedingung so gut wie möglich erfüllen.

In Figur 4E ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Öff-

- 10 nungswinkels θ für den Azimutwinkel $\alpha = 0^\circ$ für die zwei benachbarten planparallelen (100)-Linsen gleicher Dicke der Figur 4D dargestellt. Der maximale Wert für die intrinsische Doppelbrechung bei dem Öffnungswinkel $\theta = 41^\circ$ beträgt 4.2nm/cm und ist somit um 35% zu dem Maximalwert von 6.5nm/cm in Figur 4A reduziert.

- 15 In Figur 4F ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Azimutwinkels α für den Öffnungswinkel $\theta = 41^\circ$ für die zwei benachbarten planparallelen (100)-Linsen gleicher Dicke der Figur 4D dargestellt. Die intrinsische Doppelbrechung ist unabhängig vom Azimutwinkel α .

- 20 In Figur 5A ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Öffnungswinkels θ für den Azimutwinkel $\alpha = 0^\circ$ für eine (111)-Linse dargestellt. Der Wert für die intrinsische Doppelbrechung von 6.5nm/cm bei dem Öffnungswinkel $\theta = 35^\circ$ entspricht dem Messwert. Der Kurvenverlauf wurde gemäß den aus der Kristallographie bekannten Formeln bestimmt.

25

In Figur 5B ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Azimutwinkels α für den Öffnungswinkel $\theta = 35^\circ$ für eine (111)-Linse dargestellt. Die dreizählige Azimutalsymmetrie ist offensichtlich.

- 30 Figur 5C zeigt die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$ für einzelne Strahlrichtungen im (θ, α) -Winkelraum für eine (111)-Linse in der bereits mit Fig. 4C eingeführten Darstellung. Sowohl die Richtungen als auch die Längen der Linien zeigen die Dreizählig-

keit der Verteilung. Die Länge der Linien und damit die Doppelbrechung ist bei den Azimutwinkeln 0° , 120° und 240° maximal. Im Gegensatz zu einer (100)-Linse dreht sich die Orientierung der Doppelbrechung um 90° , wenn ein Strahl anstatt mit einem Azimutwinkel von 0° mit einem Azimutwinkel von 180° durch eine Linse läuft. Somit 5 kann beispielsweise durch zwei gleich orientierte (111)-Linsen die Doppelbrechung kompensiert werden, wenn die Strahlwinkel eines Strahlbüschels zwischen den beiden Linsen ihr Vorzeichen tauschen.

Figur 5D zeigt nun die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$, die sich ergibt, wenn zwei 10 benachbarte planparallele (111)-Linsen gleicher Dicke um 60° gedreht angeordnet werden. Die resultierende Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$ ist unabhängig vom Azimutwinkel α . Die längeren Hauptachsen der Schnittellipsen verlaufen jedoch im Gegensatz zu Figur 4C radial. Die resultierenden optischen Wegunterschiede zweier zueinander orthogonaler Polarisationszustände erhält man, indem man die Doppelbrechungswerte 15 mit den physikalischen Weglängen der Strahlen innerhalb der (111)-Linsen multipliziert. Ebenfalls rotationssymmetrische Doppelbrechungsverteilungen erhält man, wenn man n planparallele (111)-Linsen gleicher Dicke derart anordnet, daß für die Drehwinkel zwischen je zwei Linsen gilt: $\gamma = \frac{120^\circ}{k} + 1 \cdot 120^\circ \pm 5^\circ$

wobei k die Anzahl der planparallelen (111)-Linsen angibt und 1 eine ganze Zahl ist. Im 20 Vergleich zu einer gleichorientierten Anordnung der Linsen kann der Wert der Doppelbrechung für den Öffnungswinkel $\theta = 30^\circ$ um 68% reduziert werden. Eine nahezu rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände ergibt sich auch für beliebige Linsen, wenn alle 25 Strahlen eines Strahlbüschels in den Linsen jeweils ähnlich große Winkel aufweisen und ähnlich große Weglängen innerhalb der Linsen zurücklegen. Die Linsen sollten deshalb so zu Gruppen zusammengefaßt werden, daß die Strahlen die zuvor angegebene Bedingung so gut wie möglich erfüllen.

In Figur 5E ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Öffnungswinkels θ für den Azimutwinkel $\alpha = 0^\circ$ für die zwei benachbarten planparallelen 30 (111)-Linsen gleicher Dicke der Figur 5D dargestellt. Der maximale Wert für die intrin-

sische Doppelbrechung bei dem Öffnungswinkels $\theta = 41^\circ$ beträgt 2.8nm/cm und ist somit um 57% zu dem Maximalwert von 6.5nm/cm in Figur 5A reduziert.

In Figur 5F ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Azimutwinkels α für den Öffnungswinkel $\theta = 41^\circ$ für die zwei benachbarten planparallelen (111)-Linsen gleicher Dicke der Figur 5D dargestellt. Die intrinsische Doppelbrechung ist unabhängig vom Azimutwinkel α .

Kombiniert man nun innerhalb eines Projektionsobjektives Gruppen mit (100)-Linsen und Gruppen mit (111)-Linsen, so kann die von diesen Linsen eingebrachten optischen Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände weitgehend kompensiert werden. Dazu ist es erforderlich, daß zunächst innerhalb dieser Gruppen durch Drehung der Linsen eine nahezu rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede erzielt wird und sich dann durch Kombination einer Gruppe mit (100)-Linsen und einer Gruppe mit (111)-Linsen die beiden Verteilungen der optischen Wegunterschiede kompensieren. Dazu nutzt man aus, daß die Orientierungen der längeren Hauptachsen der Schnittellipsen für die Doppelbrechungsverteilung einer Gruppe mit gedrehten (100)-Linsen senkrecht auf den Orientierungen der längeren Hauptachsen der Schnittellipsen für die Doppelbrechungsverteilung einer Gruppe mit gedrehten (111)-Linsen steht, wie dies den Figuren 4D und 5D zu entnehmen ist. Entscheidend ist dabei, daß zum einen von den einzelnen Gruppen eine nahezu rotationsymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede erzeugt wird und zum anderen die Summe der Beiträge der Gruppen mit (100)-Linsen dem Betrage nach nahezu gleich groß ist zur Summe der Beiträge der Gruppen mit (111)-Linsen.

25

In Figur 6A ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Öffnungswinkels θ für den Azimutwinkel $\alpha = 0^\circ$ für eine (110)-Linse dargestellt. Der Wert für die intrinsische Doppelbrechung von 6.5nm/cm bei dem Öffnungswinkel $\theta = 0^\circ$ entspricht dem Messwert. Der Kurvenverlauf wurde gemäß den aus der Kristallographie bekannten Formeln bestimmt.

In Figur 6B ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Azimutwinkels α für den Öffnungswinkel $\theta = 35^\circ$ für eine (110)-Linse dargestellt. Die zweizählige Azimutalsymmetrie ist offensichtlich.

- 5 Figur 6C zeigt die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$ für einzelne Strahlrichtungen im (θ, α) -Winkelraum für eine (110)-Linse in der bereits mit Fig. 4C eingeführten Darstellung. Sowohl die Richtungen als auch die Längen der Linien zeigen die Zweizähligkeit der Verteilung. Die Linie mit maximaler Länge und damit die maximale Doppelbrechung ergibt sich für den Öffnungswinkel $\theta = 0^\circ$.

10

Figur 6D zeigt nun die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$, die sich ergibt, wenn zwei benachbarte planparallele (110)-Linsen gleicher Dicke um 90° gedreht angeordnet werden.

- 15 Die resulierende Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$ weist nun eine vierzählige Azimutalsymmetrie auf. Maximale Doppelbrechungswerte treten bei den Azimutwinkeln $\alpha = 45^\circ, 135^\circ, 225^\circ$ und 315° auf, wobei der Wert der Doppelbrechung für den Öffnungswinkel $\theta = 40^\circ$ 2.6nm/cm beträgt.

- 20 Figur 6E zeigt nun die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$, die sich ergibt, wenn die zwei planparallelen (110)-Linsen gleicher Dicke der Figur 6C mit zwei weiteren planparallelen (110)-Linsen gleicher Dicke kombiniert werden. Der Drehwinkel zwischen je zwei der (110)-Linsen beträgt 45° . Die resultierende Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\theta, \alpha)$ ist unabhängig vom Azimutwinkel α . Die längeren Hauptachsen der Schnittellinsen verlaufen jedoch im Gegensatz zu Figur 4C radial, also ähnlich der Verteilung von Figur 5C. Die resultierenden optischen Wegunterschiede zweier zueinander orthogonaler Polarisationszustände erhält man, indem man die Doppelbrechungswerte mit den physikalischen Weglängen der Strahlen innerhalb der (110)-Linsen multipliziert. Ebenfalls rotationssymmetrische Doppelbrechungsverteilungen erhält man, wenn man 4·n planparallele (110)-Linsen gleicher Dicke derart anordnet, daß für die Drehwinkel β
- 25 zwischen je zwei Linsen gilt: $\beta = \frac{45^\circ}{n} + m \cdot 90^\circ \pm 5^\circ$,
- 30

- wobei $4 \cdot n$ die Anzahl der planparallelen (100)-Linsen angibt und m eine ganze Zahl ist. Eine nahezu rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände ergibt sich auch für beliebige Linsen, wenn alle Strahlen eines Strahlbüschels in den Linsen jeweils ähnlich große Winkel
- 5 aufweisen und ähnlich große Weglängen innerhalb der Linsen zurücklegen. Die Linsen sollten deshalb so zu Gruppen zusammengefaßt werden, daß die Strahlen die zuvor angegebene Bedingung so gut wie möglich erfüllen.

In Figur 6F ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Öffnungswinkels θ für den Azimutwinkel $\alpha = 0^\circ$ für die vier benachbarten planparallelen (110)-Linsen gleicher Dicke der Figur 6E dargestellt. Der Wert für die intrinsische Doppelbrechung bei dem Öffnungswinkel $\theta = 41^\circ$ beträgt 1.0nm/cm und ist somit um 84% zu dem Maximalwert von 6.5nm/cm in Figur 5A reduziert.

- 10 15 In Figur 6G ist der Betrag der intrinsischen Doppelbrechung in Abhängigkeit des Azimutwinkels α für den Öffnungswinkel $\theta = 41^\circ$ für die vier benachbarten planparallelen (110)-Linsen gleicher Dicke der Figur 6E dargestellt. Die intrinsische Doppelbrechung ist unabhängig vom Azimutwinkel α .
- 20 25 Kombiniert man nun innerhalb eines Projektionsobjektives Gruppen mit (110)-Linsen und Gruppen mit (100)-Linsen, so kann die von diesen Linsen eingebrachten optischen Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände weitgehend kompensiert werden. Dazu ist es erforderlich, daß zunächst innerhalb dieser Gruppen durch Drehung der Linsen eine nahezu rotationssymmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede erzielt wird und sich dann durch Kombination einer Gruppe mit (110)-Linsen und einer Gruppe mit (100)-Linsen die beiden Verteilungen der optischen Wegunterschiede kompensieren. Dazu nutzt man aus, daß die Orientierungen der längeren Hauptachsen der Schnittellipsen für die Doppelbrechungsverteilung einer Gruppe mit gedrehten (110)-Linsen senkrecht auf den Orientierungen der längeren Hauptachsen der Schnittellipsen für die Doppelbrechungsverteilung einer Gruppe mit gedrehten (100)-Linsen steht, wie dies den Figuren 4D und 6E zu entnehmen ist. Entscheidend ist dabei, daß zum einen von den einzelnen Gruppen eine nahezu rotations-
- 30

symmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede erzeugt wird und zum anderen die Summe der Beiträge der Gruppen mit (110)-Linsen dem Betrage nach nahezu gleich groß ist zur Summe der Beiträge der Gruppen mit (100)-Linsen.

- 5 In Figur 7 ist der Linsenschnitt eines refraktiven Projektionsobjektivs 611 für die Wellenlänge 157nm dargestellt. Die optischen Daten für dieses Objektiv sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Das Ausführungsbeispiel ist der Patentanmeldung PCT/EP00/13148 der Anmelderin entnommen und entspricht dort Figur 7 beziehungsweise Tabelle 6. Zur näheren Beschreibung der Funktionsweise des Objektivs wird auf die Patentanmeldung
10 PCT/EP00/13148 verwiesen. Alle Linsen dieses Objektivs bestehen aus Kalzium-Fluorid-Kristall. Die bildseitige numerische Apertur des Objektivs beträgt 0.9. Die Abbildungsleistung dieses Objektivs ist so gut korrigiert, daß die Abweichung von der Wellenfront einer idealen Kugelwelle kleiner $1.8m\lambda$ bezogen auf die Wellenlänge von 157nm ist. Gerade bei diesen Hochleistungsoptiken ist es erforderlich, daß störende
15 Einflüsse wie die der intrinsischen Doppelbrechung so weit wie möglich reduziert werden.

Für das Ausführungsbeispiel der Figur 6 wurden die Öffnungswinkel θ und Strahlwege RL_L des äußersten Aperturstrahls 609 für die einzelnen Linsen L601 bis L630 berechnet. Der äußerste Aperturstrahl 609 geht dabei von dem Objektpunkt mit den Koordinaten $x = 0\text{mm}$ und $y = 0\text{mm}$ aus und weist in der Bildebene einen Winkel bezüglich der optischen Achse auf, welcher der bildseitigen numerischen Apertur entspricht. Der äußerste Aperturstrahl 609 wird deshalb herangezogen, da sich für ihn nahezu die maximalen Öffnungswinkel innerhalb der Linsen ergeben.

Linse	Öffnungs-winkel θ [°]	Strahlweg RL_L [mm]	Optischer Wegunterschied (111)-Linse $\alpha_L = 0^\circ$ [mm]	Optischer Wegunterschied (111)-Linse $\alpha_L = 60^\circ$ [mm]	Optischer Wegunterschied (100)-Linse $\alpha_L = 0^\circ$ [mm]	Optischer Wegunterschied (100)-Linse $\alpha_L = 45^\circ$ [mm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 0^\circ$ [mm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 45^\circ$ [mm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 90^\circ$ [mm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 135^\circ$ [mm]
L601	8.1	15.1	2.9	-2.2	-0.8	-0.4	-9.0	-9.0	-9.1	-9.0
L602	8.7	8.2	1.7	-1.2	-0.5	-0.2	-4.9	-4.8	-4.9	-4.8
L603	7.8	9.5	1.7	-1.3	-0.4	-0.2	-5.7	-5.7	-5.7	-5.7
L604	10.7	7.2	1.9	-1.3	-0.6	-0.3	-4.1	-4.1	-4.1	-4.1
L605	9.4	6.5	1.5	-1.0	-0.4	-0.2	-3.8	-3.8	-3.8	-3.8
L606	10.3	8.5	2.1	-1.4	-0.7	-0.3	-4.8	-4.8	-4.8	-4.8
L607	21.8	12.7	6.6	-2.7	-3.9	-1.8	-4.2	-4.2	-4.3	-4.2
L608	25.4	22.2	12.8	-4.4	-8.7	-3.9	-5.3	-5.7	-5.8	-5.7
L609	16.3	36.1	14.3	-7.6	-6.8	-3.3	-16.5	-16.5	-16.7	-16.5
L610	12.2	15.2	4.5	-2.9	-1.7	-0.8	-8.2	-8.2	-8.2	-8.2
L611	2.3	26.6	1.4	-1.3	-0.1	-0.1	-17.2	-17.2	-17.2	-17.2
L612	2.3	32.2	1.6	-1.5	-0.1	-0.1	-20.8	-20.8	-20.8	-20.8
L613	-18.3	30.4	-6.6	13.5	-7.0	-3.3	-12.5	-12.6	-12.7	-12.6
L614	-18.7	22.0	-4.8	10.0	-5.3	-2.5	-8.9	-8.9	-9.0	-8.9
L615	-14.0	10.2	-2.0	3.5	-1.5	-0.7	-5.1	-5.1	-5.2	-5.1
L616	-1.3	29.8	-0.8	0.9	0.0	0.0	-19.3	-19.3	-19.3	-19.3
L617	26.4	31.6	18.6	-6.1	-13.0	-5.7	-6.7	-7.6	-7.5	-7.6
L618	33.5	14.3	9.3	-2.0	-7.9	-3.1	-0.6	3.2	-1.4	3.2
L619	26.5	7.5	4.4	-1.4	-3.1	-1.4	-1.6	-1.8	-1.8	-1.8
L620	19.3	6.4	3.0	-1.4	-1.6	-0.8	-2.5	-2.5	-2.5	-2.5
L621	6.7	8.0	1.3	-1.0	-0.3	-0.1	-4.9	-4.9	-4.9	-4.9
L622	-10.3	7.7	-1.3	1.9	-0.6	-0.3	-4.4	-4.4	-4.4	-4.4
L623	-11.9	9.6	-1.8	2.8	-1.0	-0.5	-5.2	-5.2	-5.2	-5.2
L624	0.3	17.8	0.1	-0.1	0.0	0.0	-11.6	-11.6	-11.6	-11.6
L625	6.0	16.3	2.3	-1.8	-0.5	-0.2	-9.9	-9.9	-10.0	-9.9
L626	-24.0	9.0	-1.9	5.0	-3.2	-1.5	-2.5	-2.6	-2.6	-2.6
L627	-35.6	8.0	-0.9	5.2	-4.7	-1.7	0.1	2.1	-0.5	2.1
L628	-39.4	12.0	-1.0	7.6	-7.5	-2.5	1.0	4.0	-0.3	4.0
L629	-35.3	27.3	-3.3	17.7	-15.7	-5.9	0.5	6.9	-1.9	6.9
L630	-35.3	26.0	-3.1	16.9	-15.0	-5.6	0.4	6.5	-1.9	6.5
Summe			64,5	42,3	112,9	47,4	-198.2	-178.7	-208.0	-178.8

Tabelle 2

Neben den Öffnungswinkeln θ und den Weglängen RL_L für den äußersten Aperturstrahl sind in Tabelle 2 die optischen Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisatoinszustände für verschiedene Lisenorientierungen zusammengestellt. Die optischen Wegunterschiede sind für (111)-Linsen, (100)-Linsen und (110)-Linsen zu-

sammengestellt, wobei der Azimutwinkel α_L des äußersten Randstrahl innerhalb der Linsen für eine (111)-Linse 0° und 60° , für eine (100)-Linse 0° und 45° und für eine (110)-Linse 0° , 45° , 90° und 135° beträgt.

- 5 Tabelle 2 ist zu entnehmen, daß die Öffnungswinkel θ für die Linsen L608, L617, L618, L619, L627, L628, L629 und L630 größer als 25° , für die Linsen L618, L627, L628, L629 und L630 sogar größer als 30° sind. Besonders betroffen von hohen Öffnungswinkeln sind die der Bildebene am nächsten gelegenen Linsen L627 bis L630.
- 10 Durch das Design des Projektionsobjektives wurde erreicht, daß der maximale Öffnungswinkel aller Lichtstrahlen kleiner 45° ist. Der maximale Öffnungswinkel für den äußersten Aperturstrahl beträgt 39.4° bei der Linse L628. Hilfreich war der Einsatz von zwei dicken Planlinsen L629 und L630 unmittelbar vor der Bildebene.
- 15 Der Durchmesser der Blende, welche sich zwischen den Linsen L621 und L622 befindet, beträgt 270mm. Der Durchmesser der Linse L618 beträgt 207mm und die Durchmesser der Linsen L627 bis L630 sind alle kleiner 190mm. Somit sind die Durchmesser dieser Linsen, welche hohe Öffnungswinkel aufweisen, kleiner als 80% des Blenden-durchmessers.
- 20 Tabelle 2 ist zu entnehmen, daß es für einzelne Linsen mit großen Öffnungswinkeln günstig ist, diese in (100)-Richtung zu orientieren, da die Doppelbrechungswerte insgesamt niedriger sind. Dies liegt daran, daß bei (100)-Linsen der Einfluß der <110>-Kristallrichtungen erst bei größeren Winkeln zu spüren ist wie bei (111)-Linsen. Bei-
25 spielsweise bei den Linsen L608, L609 und L617 sind die optischen Wegunterschiede um mehr als 30% niedriger.

- 30 Anhand der beiden planparallelen Linsen L629 und L630 läßt sich gut zeigen, wie durch gegenseitige Drehung der Linsen die Doppelbrechung deutlich reduziert werden kann. Beide Linsen weisen gleiche Öffnungswinkel für den äußersten Aperturstrahl von 35.3° und ähnliche Strahlwege von 27.3mm, beziehungsweise 26.0mm auf. Würden beide Linsen als (100)-Linsen gleich orientiert eingebaut werden, so würde sich ein op-

tischer Wegunterschied von 30.7nm ergeben. Verdreht man die beiden (100)-Linsen jedoch gegenseitig um 45°, so reduziert sich der optische Wegunterschied auf 20.9nm, also um 32%. Würden beide Linsen als (111)-Linsen gleich orientiert eingebaut werden, so würde sich ein Optischer Wegunterschied von 34.6nm ergeben. Verdreht man die 5 beiden (111)-Linsen jedoch gegenseitig um 60°, so reduziert sich der optische Wegunterschied auf 13.6nm, also um 61%.

Eine nahezu vollständige Kompensation der optischen Wegdifferenzen für zwei aufeinander orthogonale lineare Polarisationszustände auf Grund der intrinsischen Doppelbrechung, die durch die Linsen L629 und L630 hervorgerufen wird, kann erreicht werden, 10 wenn die Linse L629 in die Linsen L6291 und L6292 und die Linse L630 in die Linsen L6301 und L6302 aufgespalten wird, wobei die Linse L6291 eine (100)-Linse der Dicke 9.15mm, die Linse L6292 eine (111)-Linse der Dicke 13.11mm, die Linse L6301 eine (100)-Linse der Dicke 8.33mm und die Linse L6302 eine (111)-Linse der Dicke 15 12.9mm ist. Die Linse L6291 und L6301 werden gegeneinander um 45°, die Linsen L6292 und L6302 um 60° gedreht. Der resultierende maximale optische Wegunterschied beträgt in diesem Fall dann 0.2nm. Die Linsen L6291 und L6292, ebenso wie die Linsen L6301 und L6302 können optisch nahtlos, beispielsweise durch Ansprengen, gefügt werden. Dieses Prinzip ist auch anwendbar, wenn das Projektionsobjektiv nur 20 eine Kristall-Linse enthält. Diese wird dann mindestens in zwei Linsen zerlegt, die zu- einander gedreht angeordnet werden. Das Zusammenfügen ist durch Ansprengen mög- lich. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, zunächst einzelne Platten der gewünschten Kristallorientierung optisch nahtlos zu verbinden und in einem weiteren Verfahrensschritt die Linse aus den aneinandergefügten Platten zu fertigen.

25

Eine weitere Möglichkeit, den störenden Einfluß der intrinsischen Doppelbrechung durch die Linsen L629 und L630 zu reduzieren, besteht darin, die Linse L629 in die Linsen L6293 und L6294 sowie die Linse L630 in die Linsen L6303 und L6304 auf- gespalten werden, wobei die Linse L6293 dann eine (110)-Linse der Dicke 11.13mm, 30 die Linse L6294 eine (110)-Linse der Dicke 11.13mm, die Linse L6303 eine (110)- Linse der Dicke 10.62mm und die Linse L6304 eine (110)-Linse der Dicke 10.62mm ist. Die Linsen L6293 und L6294, sowie die Linsen L6303 und L6304 werden jeweils

gegeneinander um 90° gedreht, wobei der Drehwinkel zwischen der Linse L6293 und L6303 45° beträgt. Der resultierende maximale optische Wegunterschied beträgt in diesem Fall 4.2nm. Die Linsen L6293 und L6294, ebenso wie die Linsen L6303 und L6304 können als Linsenteile optisch nahtlos, beispielsweise durch Ansprengen, gefügt
5 werden.

- Nahezu vollständig gelingt eine Kompensation der optischen Wegdifferenzen für zwei aufeinander orthogonale lineare Polarisationszustände, welche durch die hoch belasteten Linsen L629 und L630 hervorgerufen wird, wenn jede Linse in drei Linsenteile L6295, *
10 L6296 und L6297 bzw. L6305, L6306 und L6307 aufgespalten wird, wobei die Linse L6295 dann eine (100)-Linse der Dicke 4.45mm, die Linsen L6296 und L6297 (110)-Linsen der Dicke 8.90mm, die Linse L6305 eine (100)-Linse der Dicke 4.25mm und die Linsen L6306 und L6307 (110)-Linsen der Dicke 8.49mm sind. Die Linsen L6294 und L6304 werden gegeneinander um 45°, je zwei der Linsen L6295, L6297, L6306 und
15 L6307 um 45° gedreht. In dieser Kombination verringert sich der resultierende maximale optische Wegunterschied auf unter 0,1 nm. Die Linsen L6295 bis L6297, ebenso wie die Linsen L6305 bis L6307 können als Linsenteile optisch nahtlos, beispielsweise durch Ansprengen, gefügt werden.
- 20 Eine weitere Möglichkeit, den störenden Einfluß der intrinsischen Doppelbrechung durch die Linsen L629 und L630 zu reduzieren, besteht darin, zwei (110)-Linsen mit einer (100)-Linse zu kombinieren. Die beiden (110)-Linsen sind dabei um 90° gegeneinander verdreht einzubauen, während der Drehwinkel zwischen der (100)-Linse und den (110)-Linsen 45°+m·90° beträgt, wobei m eine ganze Zahl ist. Dazu werden die
25 Linse L629 in die Linsen L6298 und L6299 sowie die Linse L630 in die Linsen L6308 und L6309 aufgespalten, wobei die Linse L6298 dann eine (110)-Linse der Dicke 17.40mm, die Linse L6299 eine (110)-Linse der Dicke 4.87mm, die Linse L6308 eine (110)-Linse der Dicke 12.53mm und die Linse L6309 eine (100)-Linse der Dicke 8.70mm ist. Der resultierende maximale optische Wegunterschied liegt bei 3,1 nm. Die
30 Linsen L6298 und L6299, ebenso wie die Linsen L6308 und L6309 können als Linsenteile optisch nahtlos, beispielsweise durch Ansprengen, gefügt werden.

In Figur 8 ist der Linsenschnitt eines katadioptrischen Projektionsobjektivs 711 für die Wellenlänge 157nm dargestellt. Die optischen Daten für dieses Objektiv sind in Tabelle 3 zusammengestellt. Das Ausführungsbeispiel ist der Patentanmeldung PCT/EP00/13148 der Anmelderin entnommen und entspricht dort Figur 9 beziehungsweise Tabelle 8. Zur näheren Beschreibung der Funktionsweise des Objektivs wird auf die Patentanmeldung PCT/EP00/13148 verwiesen. Alle Linsen dieses Objektivs bestehen aus Kalzium-Fluorid-Kristall. Die bildseitige numerische Apertur des Objektivs beträgt 0.8.

- 10 Für das Ausführungsbeispiel der Figur 8 wurden die Öffnungswinkel θ und Strahlwege RL_L des oberen äußersten Aperturstrahls 713 und des unteren äußersten Aperturstrahls 715 für die einzelnen Linsen L801 bis L817 berechnet. Die äußersten Aperturstrahlen 713 und 715 gehen dabei von dem Objektpunkt mit den Koordinaten $x = 0\text{mm}$ und $y = -82.15\text{mm}$ aus und weisen in der Bildebene Winkel bezüglich der optischen Achse auf, welche der bildseitigen numerischen Apertur entsprechen. Der obere und der untere äußerste Aperturstrahl wurden berechnet, da es sich um ein achsfernes Objektfeld handelt und somit die Aperturstrahlen nicht symmetrisch zur optischen Achse verlaufen, wie dies für den äußersten Aperturstrahl des Ausführungsbeispiels der Figur 7 der Fall war.
- 15

- 20 In Tabelle 4 sind die Daten für den oberen äußersten Aperturstrahl und in Tabelle 5 für den unteren äußersten Aperturstrahl zusammengestellt. Neben den Öffnungswinkeln θ und den Weglängen RL_L für den äußersten Aperturstrahl sind in Tabelle 4 und Tabelle 5 die optischen Wegunterschiede für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände für verschiedene Linsenorientierungen zusammengestellt; und zwar für (111)-Linsen, (100)-Linsen und (110)-Linsen, wobei der Azimutwinkel α_L des äußersten Randstrahl innerhalb der Linsen für eine (111)-Linse 0° und 60° , für eine (100)-Linse 0° und 45° und für eine (110)-Linse 0° , 45° , 90° und 135° beträgt.

Linse	Öffnungs-winkel θ [°]	Strahlweg RL_L [mm]	Optischer Wegunterschied (111)-Linse $\alpha_L = 0^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (111)-Linse $\alpha_L = 60^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (100)-Linse $\alpha_L = 0^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (100)-Linse $\alpha_L = 45^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 0^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 45^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 90^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 135^\circ$ [nm]
801	1.4	28.1	0.8	-0.8	0.0	0.0	-18.2	-18.2	-18.2	-18.2
802	-10.8	30.7	-5.3	8.0	-2.7	-1.3	-17.2	-17.2	-17.3	-17.2
803	-15.6	32.4	-6.8	12.4	-5.7	-2.7	-15.3	-15.3	-15.4	-15.3
803	-24.4	31.8	-6.5	17.8	-11.7	-5.2	-8.4	-8.8	-9.0	-8.8
802	-19.5	26.6	-5.8	12.4	-6.8	-3.2	-10.2	-10.3	-10.4	-10.3
804	6.4	20.1	3.0	-2.4	-0.6	-0.3	-12.4	-12.4	-12.4	-12.4
805	10.8	34.4	9.0	-6.0	-3.0	-1.5	-19.3	-19.3	-19.3	-19.3
806	0.2	10.0	0.1	-0.1	0.0	0.0	-6.5	-6.5	-6.5	-6.5
807	-11.1	22.0	-3.9	5.9	-2.1	-1.0	-12.2	-12.2	-12.3	-12.2
808	0.1	18.5	0.0	0.0	0.0	0.0	-12.0	-12.0	-12.0	-12.0
809	-0.8	9.0	-0.1	0.2	0.0	0.0	-5.8	-5.8	-5.8	-5.8
810	1.1	12.4	0.3	-0.3	0.0	0.0	-8.0	-8.0	-8.0	-8.0
811	-16.8	9.4	-2.0	3.8	-1.9	-0.9	-4.2	-4.2	-4.2	-4.2
812	-10.4	29.8	-5.0	7.5	-2.4	-1.2	-16.9	-16.9	-16.9	-16.9
813	-8.8	34.7	-5.2	7.3	-2.1	-1.0	-20.5	-20.5	-20.5	-20.5
814	-9.4	17.5	-2.8	4.0	-1.2	-0.6	-10.2	-10.2	-10.2	-10.2
815	-27.4	28.1	-5.3	16.9	-12.2	-5.3	-5.2	-6.4	-6.1	-6.4
816	-28.7	40.2	-7.1	24.8	-18.6	-7.9	-6.2	-8.5	-7.6	-8.5
817	-30.8	39.0	-6.3	24.7	-19.6	-8.1	-3.9	-8.0	-5.7	-8.0
Summe			-48.9	136.1	-90.9	-40.3	-212.9	-220.9	-218.0	-220.9

Tabelle 4

Linse	Öffnungs-winkel θ [°]	Strahlweg RL_L [mm]	Optischer Wegunterschied (111)-Linse $\alpha_L = 0^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (111)-Linse $\alpha_L = 60^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (100)-Linse $\alpha_L = 0^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (100)-Linse $\alpha_L = 45^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 0^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 45^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 90^\circ$ [nm]	Optischer Wegunterschied (110)-Linse $\alpha_L = 135^\circ$ [nm]
801	-11.6	32.1	-5.8	9.0	-3.2	-1.6	-17.6	-17.6	-17.6	-17.6
802	19.5	28.3	13.3	-6.1	-7.3	-3.4	-10.9	-10.9	-11.1	-10.9
803	24.7	33.8	19.1	-6.9	-12.7	-5.7	-8.6	-9.2	-9.3	-9.2
803	17.7	34.3	14.7	-7.4	-7.5	-3.6	-14.6	-14.6	-14.8	-14.6
802	12.7	31.6	9.7	-6.0	-3.8	-1.8	-16.7	-16.7	-16.8	-16.7
804	-5.2	27.7	-2.7	3.3	-0.6	-0.3	-17.4	-17.4	-17.4	-17.4
805	-4.5	34.6	-3.0	3.5	-0.5	-0.3	-21.9	-21.9	-21.9	-21.9
806	-8.6	19.5	-2.9	4.0	-1.1	-0.6	-11.6	-11.6	-11.6	-11.6
807	-0.5	16.5	-0.2	0.2	0.0	0.0	-10.7	-10.7	-10.7	-10.7
808	-8.2	25.6	-3.7	5.0	-1.3	-0.7	-15.3	-15.3	-15.3	-15.3
809	-7.5	10.1	-1.3	1.8	-0.4	-0.2	-6.1	-6.1	-6.1	-6.1
810	-9.1	13.1	-2.0	2.9	-0.8	-0.4	-7.7	-7.7	-7.7	-7.7
811	9.0	9.9	2.1	-1.5	-0.6	-0.3	-5.8	-5.8	-5.8	-5.8
812	2.6	30.7	1.8	-1.6	-0.2	-0.1	-19.8	-19.8	-19.8	-19.8
813	0.9	34.0	0.6	-0.6	0.0	0.0	-22.1	-22.1	-22.1	-22.1
814	1.3	10.4	0.3	-0.3	0.0	0.0	-6.7	-6.7	-6.7	-6.7
815	23.5	16.3	8.9	-3.4	-5.7	-2.6	-4.7	-4.8	-4.9	-4.8
816	24.6	37.2	21.0	-7.6	-13.9	-6.2	-9.6	-10.2	-10.3	-10.2
817	29.4	29.6	18.5	-5.1	-14.1	-5.9	-4.0	-6.2	-5.2	-6.2
Summe			88.3	-16.8	-73.7	-33.5	-231.9	-235.4	-235.2	-235.4

Tabelle 5

Tabelle 4 und Tabelle 5 ist zu entnehmen, daß die Öffnungswinkel θ für die Linsen L815 bis L817 größer als 25° sind. Auch in diesem Ausführungsbeispiel weisen die der Bildebene am nächsten gelegenen Linsen L815 bis L817 große Öffnungswinkel auf.

Durch das Design der Linsen L815 bis L817 wurde erreicht, daß der maximale Öff-

5 nungswinkel kleiner gleich $\arcsin\left(\frac{NA}{n_{FK}}\right) = \arcsin\left(\frac{0.8}{1.5597}\right) = 30.9^\circ$ ist. Der maximale

Öffnungswinkel für den äußersten Aperturstrahl beträgt 30.8° für die Linse L817.

Der Durchmesser der Blende, welche sich zwischen den Linsen L811 und L812 befindet, beträgt 193mm. Die Durchmesser der Linsen L815 bis L817 sind alle kleiner als

10 162mm. Somit sind die Durchmesser dieser Linsen, welche hohe Öffnungswinkel aufweisen, kleiner als 85% des Blendendurchmessers.

Tabelle 4 und Tabelle 5 ist zu entnehmen, daß es für Linsen mit großen Öffnungswinkeln günstig ist, diese in (100)-Richtung zu orientieren, da die Doppelbrechungswerte

15 insgesamt niedriger sind. Beispielsweise bei den Linsen L815 bis L817 sind die optischen Wegunterschiede um mehr als 20% niedriger.

Anhand des Ausführungsbeispiels der Figur 8 soll im folgenden gezeigt werden, wie durch den parallelen Einsatz von Gruppen mit gegeneinander verdrehten (100)-Linsen

20 und Gruppen mit gegeneinander verdrehten (111)-Linsen die intrinsische Doppelbrechung weitgehend kompensiert werden kann.

Zunächst werden alle Kalzium-Fluorid in (111)-Orientierung ohne gegenseitiges Ver-

drehen der (111)-Linsen eingebaut. In diesem Fall ergibt sich ein maximaler optischer

25 Wegunterschied für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände von 136nm. Durch Drehen der (111)-Linsen kann der maximale optische Wegunterschied auf ca. 38nm reduziert werden. Dazu werden die Linsen L801 und L804 zu einer Gruppe

pe und die Linsen L802 und L803 zu einer weiteren Gruppe zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen den Linsen jeweils 60° beträgt. Zu je einer Dreier-Gruppe

30 werden die Linsen L808, L809 und L810, sowie die Linsen L815, L816 und L817 zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen je zwei dieser Linsen 40° beträgt. Die

Linsen L811, L812, L813 und L814 werden zu einer Vierer-Gruppe zusammengefaßt mit einem gegenseitigen Drehwinkel von 30°.

Werden alle Kalzium-Fluorid in (100)-Orientierung ohne gegenseitiges Verdrehen der

- 5 (100)-Linsen eingebaut, so ergibt sich ein maximaler optischer Wegunterschied für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände von 90.6nm. Durch Drehen der (100)-Linsen kann der maximale optische Wegunterschied auf ca. 40nm reduziert werden. Dazu werden die Linsen L801 und L804 zu einer Gruppe und die Linsen L802 und L803 zu einer weiteren Gruppe zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen den
10 Linsen jeweils 45° beträgt. Zu je einer Dreier-Gruppe werden die Linsen L808, L809 und L810, sowie die Linsen L815, L816 und L817 zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen je zwei dieser Linsen 30° beträgt. Die Linsen L811, L812, L813 und L814 werden zu einer Vierer-Gruppe zusammengefaßt mit einem gegenseitigen Drehwinkel von 22.5°.

15

Eine maximalen optischen Wegunterschied für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände von 7nm erhält man, wenn man nun Gruppen mit (100)-Linsen mit Gruppen mit (111)-Linsen kombiniert. Dazu werden die Linsen L801 und L804 zu einer Gruppe von (111)-Linsen zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen den

- 20 Linsen 60° beträgt. Die Linsen L802 und L803 werden zu einer Gruppe von (100)-Linsen zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen den Linsen 45° beträgt. Zu einer Dreier-Gruppe von (100)-Linsen werden die Linsen L808, L809 und L810 zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen je zwei dieser Linsen 30° beträgt. Zu einer Dreier-Gruppe von (111)-Linsen werden die Linsen L815, L816 und L817 zusammengefaßt, wobei der Drehwinkel zwischen je zwei dieser Linsen 40° beträgt. Die Linsen L811, L812, L813 und L814 werden zu einer Vierer-Gruppe von (100)-Linsen zusammengefaßt mit einem Drehwinkel von 22.5°. Die Linsenachsen der nicht zu einer Gruppe zusammengefaßten Linsen L805 und L807 sind in <111>-Kristallrichtung orientiert, während die Linsenachse der Linse L806 in <100>-Kristallrichtung orientiert
25 ist. Die Gruppen können gegenseitig beliebig um die optische Achse verdreht angeordnet sein. Diese Drehfreiheitsgrade lassen sich zur Kompensation nicht rotationssymmet-
- 30

rischer Aberrationen ausnützen, die beispielsweise durch die Fassung der Linsen erzeugt werden.

Anhand des refraktiven Objektivs 611 soll im folgenden gezeigt werden, wie durch Belegung eines optischen Elements mit einer Kompensations-Beschichtung 613 der störende Einfluß von Doppelbrechungseffekten deutlich reduziert werden kann. Es sollen hierzu nur die Doppelbrechungs-Beiträge der beiden Linsen L629 und L630 betrachtet werden, die aus Kalzium-Fluorid bestehen und damit intrinsische Doppelbrechung zeigen. Die beiden Linsen haben in diesem Ausführungsbeispiel eine (111)-Orientierung und sind um 60° gegeneinander verdreht. Damit erreicht man eine nahezu rotations-symmetrische Verteilung der optischen Wegunterschiede ΔOPL . Für einen äußersten Aperturstrahl beträgt der maximale optische Wegunterschied ΔOPL zwischen 13.6nm und 14.6 nm, je nach Azimutwinkel α_R . Nun wird auf der der Bildebene O' zugewandten optischen Fläche der Linse L630 die in Tabelle 6 beschriebene Kompensations-Beschichtung 613 aufgebracht. Die Kompensations-Beschichtung 613 besteht aus 15 einzelnen Schichten aus den Materialien Magnesium-Fluorid (MgF_2) und Lanthan-Fluorid (LaF_3). n und k in Tabelle 6 geben Real- und Imaginärteil des Brechungsindex an. Die Schichtdicken sind homogen und weisen keinen lateralen Dickenverlauf auf. Die Aufdampfwinkel während der Beschichtung stehen senkrecht zur optischen Fläche der Linse L630. Mit der Kompensations-Beschichtung beträgt der resultierende optische Wegunterschied 1.1 nm und ist somit deutlich reduziert im Vergleich zum Objektiv ohne Kompensations-Beschichtung.

Schicht	Dicke [nm]	Material
	Substrat	CaF2
1	103.54	MgF2
2	41.54	LaF3
3	33.35	MgF2
4	30.8	LaF3
5	39.53	MgF2
6	35.34	LaF3
7	32.05	MgF2
8	27.25	LaF3
9	28.57	MgF2
10	26.48	LaF3
11	27.64	MgF2
12	26.17	LaF3
13	27.36	MgF2
14	26.11	LaF3
15	8.66	MgF2

Optische Konstanten	n	k
LaF3	1.760026	0.00118471
MgF2	1.506675	0.00305275

Tabelle 6

5

Eine analoge Vorgehensweise ist auch möglich, wenn statt der beiden letzten Linsen das gesamte Objektiv betrachtet wird. Anstatt die Doppelbrechung mit nur einem optischen Element mit einer Kompensations-Beschichtung zu kompensieren kann man auch mehrere optische Elemente mit Kompensations-Beschichtungen belegen.

10

Das Verfahren kann auch angewendet werden, um Doppelbrechung in einem Gesamt- system zu kompensieren, wobei die Ursachen dieser Doppelbrechung Spannungsdop-

pelbrechung, intrinsische Doppelbrechung und Doppelbrechung durch die übrigen Schichten sein können.

- Nach der Endjustage eines Systems wird die Verteilung der optischen Wegunterschiede ΔOPL für ein oder mehrere Strahlenbüschel in der Bildebene bestimmt. Mittels eines
5 Programms zur Optimierung von Schichten wird dann die notwendige Kompensations-
schicht berechnet und zum Beispiel auf der Bildebene am nächsten gelegenen Sys-
temfläche aufgebracht. Es ist günstig, wenn das der Bildebene am nächsten gelegene
optische Element austauschbar ist. So lassen sich auch Doppelbrechungs-Effekte, die
erst mit dem Betrieb des Objektivs entstehen, korrigieren.

10

- Um Doppelbrechung von Kristallen im UV zu kompensieren, kann man, wie oben be-
schrieben, Kristall-Elemente mit verschiedenen Orientierungen der Kristallachsen hin-
tereinander anordnen. Wenn man in einem optischen System Linsen mit verschiedenen
15 Kristallrichtungen hintereinander anordnet, hat man das Problem, daß vielfach Linsen
mit verschiedenen Winkeln durchstrahlt werden, die Kompensation dann möglicherwei-
se nur eingeschränkt möglich ist. Bei Optiken, die nur eine Kristalllinse enthalten, ist
diese Art der Kompensation überhaupt nicht möglich.

- Ein Lösungsmöglichkeit ist es, eine Linse konstruktiv in zwei aufzuspalten, die verdreht
gegeneinander anzusprengen sind. Praktisch leidet dieses Verfahren an Spannungen, die
20 die Passe verformen und daran, daß die beiden Hälften lateral mit einer Genauigkeit von
Mikrometern positioniert werden müssen.

- Vorgeschlagen wird, Blanks aus aneinander angesprengten, hinsichtlich der Orientie-
rung der Kristallachsen gegeneinander verdrehten Einzelplatten herzustellen, die dann
zu einer Linse gefräst und poliert werden. Alles obengesagte über die Orientierung gilt
25 auch hierfür.

- Außer dem klassischen Ansprenge (wringing) der Optik-Fertigung sind auch alle ande-
ren Fügetechniken mit innigem Kontakt und geringstmöglichen Spannungseintrag
möglich und von der Erfindung umfaßt. Das Ansprenge kann insbesondere durch
Schichten, z. B. aus Quarzglas, unterstützt werden. Wichtig ist, daß an der Fügestelle
30 keine Brechung oder Reflexion auftritt, die störend wäre.

Die Auswahl der Orientierungen erfolgt nach den oben beschriebenen Regeln.

Als Ausführungsbeispiele werden Blanks angegeben, aus denen sich beispielsweise die Linse L816 für das Projektionsobjektiv der Figur 8 fertigen lässt. Die Linse L816 weist eine konvexe asphärische Vorderfläche mit dem Scheitelradius 342.13mm und eine

- 5 konkave sphärische Rückfläche mit dem Scheitelradius 449.26mm auf. Die axiale Dicke beträgt 37.3mm. Das Linsenmaterial ist Kalzium-Fluorid. Der Linsendurchmesser beträgt 141mm. Das Blank, aus dem die Linse herausgearbeitet werden soll, benötigt mindestens eine Gesamtdicke von 45mm und einen Durchmesser von 150mm. Das Blank kann dabei aus zwei gegeneinander um 45° gedrehten (100)-Platten der Dicke 9.0mm
10 und zwei gegeneinander um 60° gedrehten (111)-Platten der Dicke 13.5mm bestehen, die optisch nahtlos gefügt sind. Die (100)-Platten und die (111)-Platten sollten dabei jeweils benachbart angeordnet sein.

In einer weiteren Ausführungsform werden sechs jeweils gegeneinander um 45° gedrehte

- 15 (100)-Platten der Dicke 3.0mm und sechs jeweils gegeneinander um 60° gedrehte (111)-Platten der Dicke 4.5 optisch nahtlos gefügt, wobei jeweils nach zwei (100)-Platten zwei (111)-Platten folgen.

In einer weiteren Ausführungsform werden vier jeweils gegeneinander um 45° gedrehte

- 20 (110)-Platten der Dicke 9.0mm und zwei gegeneinander um 45° gedrehte (100)-Platten der Dicke 4.5 optisch nahtlos gefügt, wobei die zwei (100)-Platten auf die vier (110)-Platten folgen.

In einer weiteren Ausführungsform werden acht jeweils gegeneinander um 45° gedrehte

- 25 (110)-Platten der Dicke 4.5mm und vier gegeneinander um 45° gedrehte (100)-Platten der Dicke 2.25 optisch nahtlos gefügt, wobei nach vier (110)-Platten jeweils zwei (100)-Platten folgen.

Anhand von Figur 9 wird der prinzipielle Aufbau einer Mikrolithographie-

- 30 Projektionsbelichtungsanlage beschrieben. Die Projektionsbelichtungsanlage 81 weist eine Beleuchtungseinrichtung 83 und Projektionsobjektiv 85 auf. Das Projektionsobjektiv 85 umfaßt eine Linsenanordnung 819 mit einer Aperturblende AP, wobei durch die

Linsenanordnung 89 eine optische Achse 87 definiert wird. Ausführungsbeispiele für die Linsenanordnung 89 sind in Figur 6 und Figur 7 gegeben. Zwischen der Beleuchtungseinrichtung 83 und dem Projektionsobjektiv 85 ist eine Maske 89 angeordnet, die mittels eines Maskenhalters 811 im Strahlengang gehalten wird. Solche in der Mikroolithographie verwendeten Masken 89 weisen eine Mikrometer-Nanometer Struktur auf, die mittels des Projektionsobjektives 85 beispielsweise um den Faktor 4 oder 5 verkleinert auf eine Bildebene 813 abgebildet wird. In der Bildebene 813 wird ein durch einen Substrathalter 817 positioniertes lichtempfindliches Substrat 815, beziehungsweise ein Wafer, gehalten.

10

Die noch auflösbaren minimalen Strukturen hängen von der Wellenlänge λ des für die Beleuchtung verwendeten Lichtes sowie von der bildseitigen numerischen Apertur des Projektionsobjektives 85 ab, wobei die maximal erreichbare Auflösung der Projektionsbelichtungsanlage 81 mit abnehmender Wellenlänge λ der Beleuchtungseinrichtung 83 und mit zunehmender bildseitiger numerischer Apertur des Projektionsobjektives 85 steigt. Mit den in Figur 6 und Figur 7 gezeigten Ausführungsbeispielen lassen sich Auflösungen kleiner 150nm realisieren. Deshalb müssen auch Effekte wie die intrinsische Doppelbrechung minimiert werden. Durch die Erfindung ist es gelungen, den störenden Einfluß der intrinsischen Doppelbrechung gerade bei Projektionsobjektiven mit großen bildseitigen numerischen Aperturen stark zu reduzieren.

Anhand Fig. 10 wird der Einfluss der Anisotropie einer Kompensationsbeschichtung auf die durch die Beschichtung bewirkte Doppelbrechung erläutert. Dabei werden der Absolutbetrag und die Richtung der durch die Schicht bewirkten Doppelbrechung durch den Phasenwinkel $\square\text{PH}$ der Phasenaufspaltung angegeben, also durch eine Differenz in der Wellenfront zwischen zwei zueinander orthogonalen, linearen Polarisationszuständen. Dieser Parameter ist geeignet, auch die Richtungsabhängigkeit der Doppelbrechung zu beschreiben. In Fig. 10 ist die Abhängigkeit des Phasenwinkels vom Einstrahlwinkel der Strahlung angegeben, der dem Öffnungswinkel Θ der vorangegangenen Darstellungen entspricht. Gezeigt ist die Phasenaufspaltung, die durch ein auf einem ebenen Substrat angebrachtes anisotropes Interferenzschichtsystem (Magnesium-

fluorid-Lantanfluorid-Wechselschichtpaket) bewirkt wird, das unter einem Aufdampfwinkel von 40° aufgedampft wurde. Dieses wird mit einem isotropen Schichtsystem verglichen.

- 5 Die mit HOM gekennzeichneten Kurven in der Mitte geben die Messwerte für die in Tabelle 6 angegebene, isotrope Kompensationsbeschichtung 613 an, deren Schichtdicken homogen sind und keinen lateralnen Dickenverlauf aufweisen. Wie erläutert, ist die effektive Doppelbrechung der Schicht, charakterisiert durch die Phasenaufspaltung, für den Öffnungswinkel $\Theta=0^\circ$ annähernd Null.
- 10 Für höhere Öffnungswinkel ergibt sich aufgrund des vergrößerten Strahlweges innerhalb der Schicht eine leichte Verschiebung der Phasenaufspaltung zu negativen Werten. Die durchgezogene Linie zeigt die ellipsometrischen Messwerte für Einstrahlungen in einer ersten, zur Beschichtungsoberfläche senkrechten Ebene, die hier als 0° -Ebene bezeichnet wird. Die gestrichelte Linie gibt die
- 15 Werte für die dazu senkrechte 90° -Ebene an. Es zeigt sich, dass Betrag und Richtung der Phasenaufspaltung im wesentlichen unabhängig vom Azimutwinkel \square sind. Es handelt sich somit um eine isotrope Beschichtung.

- Bei der anisotropen Beschichtung (AN) ergibt sich dagegen eine ausgeprägte
- 20 Richtungsabhängigkeit der Phasenaufspaltung vom Azimutwinkel \square . Die Kurve AN 0° zeigt die Messwerte von Einstrahlrichtungen in der ersten Ebene, die dem Azimutwinkel 0° entspricht. Im Vergleich zur homogenen Beschichtung zeigt sich im wesentlichen der gleiche Winkelverlauf, jedoch ist der Betrag der Doppelbrechung deutlich höher, wobei auch beim Einstrahlwinkel 0° eine erhebliche Phasenaufspaltung (ca. 10°) vorliegt. Im wesentlichen die gleichen Werte ergeben sich, wenn in der gleichen ersten Ebene von der in Bezug auf die optische Achse gegenüberliegenden Richtung eingestrahlt wird. Dies entspricht einer Drehung der Probe in bezug auf die Messvorrichtung um 180° (Kurve AN 180°).
 - 25

30

Wird dagegen in einer zur ersten Ebenen senkrechten Ebene eingestrahlt (Kurve AN 90°), wobei also der Azimutwinkel um 90° verändert wird, so liegt zwar

dem Betrage nach die gleiche Phasenaufspaltung vor, jedoch mit negativem Phasenwinkel. Damit ist belegt, dass mit Hilfe einer anisotropen Beschichtung die Richtung der Phasenaufspaltung gesteuert werden kann, indem eine anisotrope Beschichtung mit einer bestimmten Vorzugsrichtung hergestellt wird,

5 die dann in einer vorgegebenen Richtung relativ zu den elektrischen Feldvektoren der eintretenden Strahlung auszurichten ist.

Anhand Fig. 11 wird erläutert, dass bei anisotropen Beschichtungen auch das Ausmaß der Phasenaufspaltung, d.h. die Stärke der Doppelbrechung, gezielt
10 gesteuert werden kann. Gezeigt sind Messwerte für die Phasenaufspaltung in Abhängigkeit vom Öffnungswinkel Θ für unterschiedliche Beschichtungen. Die Karo-Symbole entsprechen dabei einem MgF₂/LaF₃-Wechselschichtpaket mit 8 Einzelschichten,
die bei 150° C aufgedampft wurden. Die Quadratsymbole entsprechen einer bei
15 gleicher Temperatur hergestellten Beschichtung mit 6 Einzelschichten dieser Materialien. Ein Vergleich der doppelbrechenden Wirkung dieser beiden Schichtsysteme zeigt, dass der Absolutbetrag der erzielbaren Phasenaufspaltung mit wachsender Anzahl der Schichten zunimmt.

20 Die Dreieckssymbole entsprechen einer Beschichtung mit 8 Schichten, die bei 250°, also deutlich höheren Temperaturen, beschichtet wurde. Im Vergleich zur entsprechenden 8lagigen Schicht bei 150° C ergeben sich deutlich niedrigere Phasenaufspaltungen.

25 Diese Tendenzen (Verstärkung der doppelbrechenden Wirkung mit steigender Schichtenzahl, Abschwächung der doppelbrechenden Wirkung mit steigender Herstelltemperatur) werden auch durch den Vergleich mit den anderen Schichtsystemen (Sechsschichter bei Raumtemperatur, Zweischichter bei 220° bzw. 150°) deutlich.

30

Auf Basis der beispielhaft dargestellten Abhängigkeiten ist es möglich, mit Hilfe anisotroper Beschichtungen polarisationswirksame optische Komponenten zu

schaffen, die über die beschichtete Fläche eine vorgebbare örtlich variierende Doppelbrechung im Bezug auf Betrag und Richtung haben. Anhand von Fig. 12 wird die Herstellung einer rotationssymmetrischen anisotropen Beschichtung einer Linse in einer Bedampfungsanlage mit Planetensystem erläutert. Das Planetensystem hat einen um eine Hauptrrotationsachse 500 drehbaren (nicht gezeigten) Haupträger, an dessen Umfang mehrere, um jeweilige Substratträgerachsen 501 drehbare Substratträger 502 angebracht sind. Jeder Substratträger trägt ein Substrat 503, das im Beispiel als Bikonvexlinse gestaltet ist. Im Bereich der Hauptrrotationsachse ist eine Materialquelle 504 für Bedampfungsma-
5 terial angeordnet, um beispielsweise Magnesiumfluorid und Lantanfluorid ab- wechselnd mit Hilfe eines Elektronenstrahls zu verdampfen und auf die der Ma-
10 terialquelle zugewandte Beschichtungsüberfläche 505 des Substrats aufzudamp- fen. Das durch gestrichelte Linien symbolisierte Beschichtungsmaterial trifft auf den jeweiligen Beschichtungsorten unter einem Aufdampfwinkel (Beschich-
15 tungswinkel) 506 auf, der durch die Geometrie der Anlage und die Krümmung der Beschichtungsüberfläche bestimmt ist.

Um in dieser Anlage eine anisotrope Beschichtung 510 zu erzeugen, ist zwi-
schen der Materialquelle 504 und dem Substrat ein Satz von Abschattungsble-
20 den 511 angeordnet, mit denen jeweils der der Materialquelle zugewandte Teil der Beschichtungsüberfläche vollständig gegen den Materialstrom abgeschattet werden kann, so dass nur der der Materialquelle abgewandte Teil der Beschich-
15 tungsüberfläche unter großen Aufdampfwinkel beschichtet wird.

25 Die schräge Aufdampfung bewirkt, dass das Schichtmaterial in einer durch schräge Striche symbolisierten, columnaren Struktur aufwächst. Die Neigungs- richtung wird dabei durch die Hauptaufdampfrichtung bestimmt. Die Ausprä-
gung dieser Morphologie kann durch die Beschichtungstemperatur beeinflusst werden, wobei die Anisotropie bei geringeren Beschichtungstemperaturen, bei-
30 spielsweise zwischen Raumtemperatur und ca. 90°C, stärker ausgeprägt ist als bei höheren Beschichtungstemperaturen, beispielsweise von über 120°C, 150°C oder 200°C.

Es ist ersichtlich, dass auf diese Weise eine zur Rotationsachse 501 rotations-symmetrische, anisotrope Beschichtung erzeugt werden kann, bei der die Vor-zugsrichtung (Neigungsrichtung der Beschichtungsmaterialsäulen) im wesentli-
5 chen in Radialrichtung weist. Aufgrund der Krümmung der Linsenfläche ergibt sich auch eine Variation des Aufdampfwinkels vom Zentrum zum Rand, wobei dieser im Beispiel von innen nach außen zunimmt, so dass die Anisotropie der Beschichtung am Rand stärker als in der Mitte ist. Bei konkaven Oberflächen wären die Verhältnisse umgekehrt. Es ist auch ersichtlich, dass durch Einstel-
10 lung des Höhenabstandes zwischen Materialquelle 504 und der Beschichtungs-oberfläche der Schwerpunkt der Auftreffwinkelverteilung eingestellt werden kann, wobei geringere Vertikalabstände zu größeren Aufdampfwinkeln führen.

Anhand Fig. 13 wird erläutert, wie durch geeignete Gestaltung von Abschattungsblenden für jeden Beschichtungsort eine von der Radialposition des Beschichtungsortes abhängige Beschichtungszeit gemäß einem vorgebbaren radialen Zeitprofil und ein gewünschtes Winkelspektrum der Wachstumsrichtungen der columnaren Strukturen vorgegeben werden kann. Die Abschattungswirkung der Blenden ist dabei symbolisch durch Blenden 511', 511'', 511''' dargestellt, die
15 ein dahinter rotierendes Substrat 503', 503'', 503''' bei dessen Rotation um die Rotationsachse 501', 501'', 501''' zeitweise gegenüber dem durch Pfeilsymbole
20 repräsentierten Materialstrom 520 der Materialquelle abschatten.

Fig. 13 (a) zeigt eine Abschattung mit einem über den gesamten Radius kon-
25 stanten Abschattungswinkel, der in Umfangsrichtung der Rotation gemessen wird. Dies wird durch ein V-förmiges „Fenster“ im Materialstrom erreicht. Diese Abschattung bewirkt, dass die Beschichtungszeit, d.h. die Zeit, die der umlaufende Beschichtungsort innerhalb des Materialstromes 520 liegt, für alle radialen Positionen im wesentlichen gleich ist. Bei ebenen Substratoberflächen
30 würde dies zu einer in Radialrichtung weitgehend gleichmäßigen Struktur führen. Würde das Abschattungsfenster z.B. gemäß der gestrichelten Linien 515 nach außen erweitert, so ergibt sich ein radiales Zeitprofil, bei dem radial innen-

liegende Bereiche länger abgeschattet werden als radial außenliegende Bereiche. Dadurch kann gegebenenfalls ein Ausgleich von geometriebedingten Schichtdickenabnahmen zum Rand erreicht werden. Es ist jedoch auch möglich, rotationssymmetrische Schichten zu erzeugen, deren Schichtdicke von der Mitte 5 zum Rand kontinuierlich zunimmt. Je schmäler der von der Abschattungsblende zugelassene Aufdampfrichtungsbereich ist, desto enger bzw. kleiner ist das Winkelspektrum der Wachstumsrichtungen der columnaren Strukturen. Ein engeres Winkelspektrum entspricht dabei in der Regel einer stärker ausgeprägten Anisotropie.

10

Das Rechteckfenster in Fig. 13 (b) bewirkt, dass die radial innenliegenden Bereiche über längere Zeitintervalle und unter starker unterschiedlichen Richtungen bedampft werden als radial außenliegende Bereiche. Hierdurch können gegebenenfalls Schichten erzeugt werden, deren Schichtdicke von der Mitte zum 15 Rand stärker abnimmt als eine allein durch die Oberflächenkrümmung bedingte Dickenabnahme. Die Anisotropie wird dagegen am Rand stärker ausgeprägt sein als in der Mitte. Bei konkaven Beschichtungsflächen kann auf diese Weise gegebenenfalls eine homogene Schichtdicke zwischen Mitte und Rand erreicht werden.

20

Die Geometrie der Blenden 511''' in Fig. 13 (c) bewirkt, dass ein zentraler Bereich 525 des Substrats 503''' ständig dem Materialstrom ausgesetzt bleibt und damit im wesentlichen isotrop beschichtet wird. Im übrigen Bereich ergibt sich ein radialer Verlauf mit in Radialrichtung sich ändernder Anisotropie und/oder 25 Schichtdicke.

Durch eine geeignete Wahl der Orientierung des Aufdampfmaterialstromes in Bezug auf die Blenden ist die Ausrichtung der Hauptachse der Beschichtung einstellbar. Wird beispielsweise bei der Anordnung gemäß Fig. 13 (a) in einer 30 um 90° versetzten Richtung (gestrichelter Pfeil) aufgedampft, resultieren columnare Strukturen, die im wesentlichen tangential ausgerichtet sind.

Um ein Eindringen von Verunreinigungen, wie Kohlenwasserstoffen, Wasserdampf oder dergleichen, in die poröse Schichtstruktur zu erschweren oder zu vermeiden, kann eine als Diffusionsbarriere dienende, weitgehend porenfreie Schutzschicht aufgebracht werden, z.B. als äußerste Schicht der Beschichtung.

- 5 Diese kann durch geeignete Schichtdicke optisch weitgehend neutral ausgebildet sein, beispielsweise als Halbwellsenschicht.

Anhand Fig. 15 wird eine Verfahrensvariante erläutert, die es ermöglicht, polarisationsoptisch wirksame Komponenten (z.B. Retarder) mit einer nahezu frei wählbaren örtlichen Doppelbrechungsverteilung herzustellen. Dazu wird zunächst ein Substrat, beispielsweise eine planparallele Platte 550, mit einer polarisationsoptisch wirksamen Beschichtung 551 belegt, deren doppelbrechende Wirkung im wesentlichen homogen oder anisotrop sein kann. Die Beschichtung hat eine Nichtgleichgewichts-Schichtstruktur, die es erlaubt, durch gezielten lokalen Energieeintrag die Morphologie der Schicht und damit deren doppelbrechenden Eigenschaften im beaufschlagten Bereich zu ändern. Es kann sich, wie im Beispiel, um eine durch schräge Aufdampfung erzeugte, anisotrope Beschichtung 551 handeln. Nach Fertigstellung der Schicht 551 wird die Schicht lokal nach einer vorgegebenen Verteilung mit einer Energie beaufschlagt, die geeignet ist, die Morphologie und damit die Doppelbrechungseigenschaften des Schichtmaterials zu verändern. Im Beispiel wird hierzu eine energiereiche Strahlung 552, beispielsweise ein Ionenstrahl oder ein geeignet aufgeweiteter Laserstrahl, durch die Öffnung 553 einer Maske 554 hindurch auf die Beschichtung eingestrahlt. In dem durch die Form der Maskeöffnung 553 vorgegebenen Bereich 555 der Beschichtung wird hierdurch eine diffusionsunterstützte Veränderung der Morphologie induziert, bei der beispielsweise die kolumnaren Wachstumsstrukturen einer anisotropen Schicht koagulieren und eine Schicht größerer Dichte und geringerer Anisotropie bilden. Es können auch nacheinander mehrere Masken unterschiedlicher Öffnungsformen genutzt werden, um komplexere örtliche Doppelbrechungsverteilungen zu erzeugen. Auch maskenlose Verfahren sind möglich, beispielsweise durch „Schreiben“ einer gewünschten Doppelbrechungsverteilungen mit Hilfe eines fokussierten energiereichen

Strahles, beispielsweise eines Laserstrahles. Auf diese Weise können nahezu beliebige örtliche Modulationen der durch eine Beschichtung bewirkten Phasenaufspaltung erzeugt werden. Die Bereich einheitlicher Phasenaufspaltung können sehr kleinräumig sein, beispielsweise wenige Millimeter groß.

5

Mit dem Verfahren können, vor allen Dingen unter Verwendung anisotroper Ausgangsschichten, Polarisationsmasken (d.h. Polarisatoren oder Verzögerungselemente mit einer ortsabhängigen Wirkung) für verschiedene Wellenlängenbereiche erzeugt werden. Ausgangsbeschichtungen für den sichtbaren Wel-

- 10 lenlängenbereich können beispielsweise durch „kalte Bedampfung“ erzeugt werden, wobei dann die Morphologieänderung durch Bestrahlung mit energiereicherem Laserlicht, z.B aus dem UV-Bereich, erzeugt werden kann. Auch für Anwendungen im UV-Bereich, insbesondere bei Wellenlänge unterhalb ca. 260 nm, müssen die Ausgangsschichten gegen die Arbeitswellenlänge stabil
15 sein. Hier ist es zweckmäßig, die Ausgangsbeschichtung bei höheren Beschichtungstemperaturen, beispielsweise zwischen 100° und 152° zu erzeugen, wodurch thermisch stabilere Beschichtungen entstehen. Die Umformung der Morphologie muss mit entsprechend größeren Energieinträgen durchgeführt werden, beispielsweise mit einem Infrarot-Laser, durch Ionenstrahlen, Elektronen-
20 strahlen oder durch geeignete Heizstempel.

- Die beschriebenen Verfahren sind auch geeignet, polarisierende Phasenschiebemarken als polarisationsoptisch wirksame Komponenten herzustellen, insbesondere unter Verwendung mindestens einer anisotropen Beschichtung. Dabei
25 können z.B. Bereiche in unmittelbarer Nähe abzubildender Strukturen, z.B. einer Linie, mit einer räumlich begrenzten anisotropen Beschichtung belegt werden, um günstige Retarderwirkung zu erzeugen. Aufbau und Funktionsweise polarisierender Phasenschiebemarken (polarized phase shift masks, P:PSM) sind z.B. in dem Artikel: „Polarized Phase Shift Mask: Concept, Design, and
30 Potential Advantages to Photolithography Process and Physical Design“ von R. Wang, W Grobmann, A. Reich und M. Thompson, Proc. SPIE Vol. 4562, Seiten 406 ff beschrieben, dessen Offenbarung durch Bezugnahme zum Inhalt die-

ser Beschreibung gemacht wird. Mit Hilfe solcher Masken kann ggf. das Problem des „phase conflict“ vermindert oder behoben werden, so dass ggf. eine Einfachbelichtung für eine Abbildung ausreichender Qualität ausreichen kann.

M1587a

TABELLE 1

	FREIER LINSEN DURCHMESSER	RADIEN	DICKEN	GLÄSER	BRECHZAHL	1/2
5						
--						
10	0	0.000000000	27.171475840	N2	1.00031429	46.200
		0.000000000	0.602670797	N2	1.00031429	52.673
10	L601	900.198243311AS	15.151284556	CaF2	1.55929035	53.454
	-235.121108435	9.531971079	N2	1.00031429	54.049	
10	L602	-167.185917779	8.294716452	CaF2	1.55929035	54.178
	-132.673519510	14.020355779	N2	1.00031429	54.901	
15	L603	-333.194588652	9.893809820	CaF2	1.55929035	53.988
	-155.450516203	15.930502944	N2	1.00031429	54.132	
15	L604	-73.572316296	7.641977580	CaF2	1.55929035	53.748
	-68.248613899AS	2.881720302	N2	1.00031429	55.167	
15	L605	-86.993585564AS	5.094651720	CaF2	1.55929035	52.580
20	L606	-238.150965327	5.379130780	N2	1.00031429	53.729
	-165.613920870	5.094651720	CaF2	1.55929035	53.730	
20		153.417884485	34.150169591	N2	1.00031429	56.762
20	L607	-92.061009990	5.094651720	CaF2	1.55929035	58.081
	8491.086261873AS	19.673523795	N2	1.00031429	74.689	
25	L608	-407.131300451	30.380807138	CaF2	1.55929035	87.291
	-140.620317156	0.761662684	N2	1.00031429	91.858	
25	L609	-4831.804853654AS	50.269660218	CaF2	1.55929035	117.436
	-192.197373609	1.688916911	N2	1.00031429	121.408	
25	L610	-367.718684892	21.227715500	CaF2	1.55929035	127.704
	-233.628547894	2.224071019	N2	1.00031429	129.305	
30	L611	709.585855080	28.736922725	CaF2	1.55929035	137.016
	1238.859445357	9.120684720	N2	1.00031429	137.428	
30	L612	1205.457051945	49.281218258	CaF2	1.55929035	138.288
	-285.321880705	1.625271224	N2	1.00031429	138.379	
35	L613	137.549591710	56.718543740	CaF2	1.55929035	108.652
	-4380.301012978AS	0.623523902	N2	1.00031429	106.138	
35	L614	2663.880214408	6.792868960	CaF2	1.55929035	103.602
	149.184979730	15.779049257	N2	1.00031429	84.589	
35	L615	281.093108064	6.792868960	CaF2	1.55929035	83.373
	184.030288413	32.341552355	N2	1.00031429	77.968	
40	L616	-222.157416308	5.094651720	CaF2	1.55929035	77.463
	101.254238115AS	56.792834221	N2	1.00031429	71.826	
40	L617	-106.980638018	5.094651720	CaF2	1.55929035	72.237
	1612.305471130	20.581065398	N2	1.00031429	89.760	
45	L618	-415.596135628	26.398111993	CaF2	1.55929035	96.803
	-204.680044631	0.713343960	N2	1.00031429	103.409	
45	L619	-646.696622394	25.867340760	CaF2	1.55929035	116.636
	-231.917626896	0.766268682	N2	1.00031429	118.569	
45	L620	-790.657607677	23.400482872	CaF2	1.55929035	128.806
	-294.872053725	0.721402031	N2	1.00031429	130.074	
50	L621	786.625567756	40.932308205	CaF2	1.55929035	141.705
	-431.247283013	12.736629300	N2	1.00031429	142.089	
50		0.000000000	-8.491086200	N2	1.00031429	134.586
50	L622	295.022653593AS	20.185109438	CaF2	1.55929035	139.341
	449.912291916	0.619840486	N2	1.00031429	137.916	
55	L623	358.934076212	48.662890509	CaF2	1.55929035	136.936
	-622.662988878	30.955714157	N2	1.00031429	135.288	
55	L624	-224.404889753	12.736629300	CaF2	1.55929035	134.760
	-251.154571510AS	16.079850229	N2	1.00031429	134.853	
60	L625	-193.582989843AS	16.510083506	CaF2	1.55929035	134.101
	-198.077570749	0.880353872	N2	1.00031429	136.109	
60	L626	206.241795157	19.927993542	CaF2	1.55929035	101.240
	338.140581666	0.925956949	N2	1.00031429	97.594	
60	L627	111.017549581	24.580089962	CaF2	1.55929035	85.023
	169.576109839	0.777849447	N2	1.00031429	81.164	

L628	117.982165264	31.161065630	CaF2	1.55929035	75.464
	921.219058213AS	6.934980174	N2	1.00031429	69.501
L629	0.000000000	22.260797322	CaF2	1.55929035	63.637
	0.000000000	4.245543100	N2	1.00031429	48.606
5 L630	0.000000000	21.227715500	CaF2	1.55929035	41.032
	0.000000000	8.491086200	N2	1.00031429	26.698
	0.000000000	0.000000000		1.000000000	11.550

Wellenlänge und Brechzahl sind gegenüber Vakuum angegeben.

10

ASPHAERISCHE KONSTANTEN

15 Asphäre der Linse L601

K	0.0000
C1	1.28594437e-007
C2	8.50731836e-013
C3	1.16375620e-016
20 C4	2.28674275e-019
C5	-1.23202729e-022
C6	3.32056239e-026
C7	-4.28323389e-030
C8	0.00000000e+000
25 C9	0.00000000e+000

Asphäre der Linse L604

30 K	-1.3312
C1	-4.03355456e-007
C2	2.25776586e-011
C3	-2.19259878e-014
C4	4.32573397e-018
35 C5	-7.92477159e-022
C6	7.57618874e-026
C7	-7.14962797e-030
C8	0.00000000e+000
C9	0.00000000e+000

40

Asphäre der Linse L605

45 K	-1.1417
C1	1.33637337e-007
C2	1.56787758e-011
C3	-1.64362484e-014
C4	3.59793786e-018
C5	-5.11312568e-022
50 C6	1.70636633e-026
C7	1.82384731e-030
C8	0.00000000e+000
C9	0.00000000e+000

55

Asphäre der Linse L607

60 K	0.0000
C1	1.34745120e-007
C2	-2.19807543e-011

C3 1.20275881e-015
C4 4.39597377e-020
C5 -2.37132819e-023
5 C6 2.87510939e-027
C7 -1.42065162e-031
C8 0.00000000e+000
C9 0.00000000e+000
Asphäre der Linse L609

10 K 0.0000
C1 6.85760526e-009
C2 -4.84524868e-013
C3 -6.28751350e-018
C4 -3.72607209e-022
15 C5 3.25276841e-026
C6 -4.05509974e-033
C7 -3.98843079e-035
C8 0.00000000e+000
C9 0.00000000e+000

20 Asphäre der Linse L613

25 K 0.0000
C1 2.24737416e-008
C2 -4.45043770e-013
C3 -4.10272049e-017
C4 4.31632628e-021
C5 -3.27538237e-025
30 C6 1.44053025e-029
C7 -2.76858490e-034
C8 0.00000000e+000
C9 0.00000000e+000

35 Asphäre der Linse L616

K 0.0000
C1 -2.83553693e-008
40 C2 -1.12122261e-011
C3 -2.05192812e-016
C4 -1.55525080e-020
C5 -4.77093112e-024
C6 8.39331135e-028
45 C7 -8.97313681e-032
C8 0.00000000e+000
C9 0.00000000e+000

50 Asphäre der Linse L622

K 0.0421
C1 7.07310826e-010
C2 -2.00157185e-014
55 C3 -9.33825109e-020
C4 1.27125854e-024
C5 1.94008709e-027
C6 -6.11989858e-032
C7 2.92367322e-036

C8 0.00000000e+000
C9 0.00000000e+000

5

10

Asphäre der Linse L624

K 0.0000
C1 3.02835805e-010
15 C2 -2.40484062e-014
C3 -3.22339189e-019
C4 1.64516979e-022
C5 -8.51268614e-027
C6 2.09276792e-031
20 C7 -4.74605669e-036
C8 0.00000000e+000
C9 0.00000000e+000

25 Asphäre der Linse L625

K 0.0000
C1 -3.99248993e-010
C2 5.79276562e-014
30 C3 3.53241478e-018
C4 -4.57872308e-023
C5 -6.29695208e-027
C6 1.57844931e-031
C7 -2.19266130e-036
35 C8 0.00000000e+000
C9 0.00000000e+000

40 Asphäre der Linse L628

K 0.0000
C1 4.40737732e-008
C2 1.52385268e-012
C3 -5.44510329e-016
45 C4 6.32549789e-020
C5 -4.58358203e-024
C6 1.92230388e-028
C7 -3.11311258e-033
C8 0.00000000e+000
50 C9 0.00000000e+000

TABELLE 3

L61

5	FREIER LINSEN DURCHMESSER	RADIEN	DICKEN	GLÄSER	BRECHZAHL	1/2
					BEI 157.13 nm	
<hr/>						
10	0	0.000000000	34.000000000		1.00000000	82.150
		0.000000000	0.100000000		1.00000000	87.654
L801	276.724757380	40.000000000		CaF2	1.55970990	90.112
	1413.944109416AS	95.000000000			1.00000000	89.442
15	<u>SP1</u>	0.000000000	11.000000000		1.00000000	90.034
	0.000000000	433.237005445			1.00000000	90.104
L802	-195.924336384	17.295305525		CaF2	1.55970990	92.746
	-467.658808527	40.841112468			1.00000000	98.732
L803	-241.385736441	15.977235467		CaF2	1.55970990	105.512
	-857.211727400AS	21.649331094			1.00000000	118.786
20	SP2	0.000000000	0.000010000		1.00000000	139.325
	253.074839896	21.649331094			1.00000000	119.350
L803'	857.211727400AS	15.977235467		CaF2	1.55970990	118.986
	241.385736441	40.841112468			1.00000000	108.546
L802'	467.658808527	17.295305525		CaF2	1.55970990	102.615
25	195.924336384	419.981357165			1.00000000	95.689
SP3	0.000000000	6.255658280			1.00000000	76.370
	0.000000000	42.609155219			1.00000000	76.064
Z1	0.000000000	67.449547115			1.00000000	73.981
L804	432.544479547	37.784311058		CaF2	1.55970990	90.274
30	-522.188532471	113.756133662			1.00000000	92.507
L805	-263.167605725	33.768525968		CaF2	1.55970990	100.053
	-291.940616829AS	14.536591424			1.00000000	106.516
L806	589.642961222AS	20.449887046		CaF2	1.55970990	110.482
	-5539.698828792	443.944079795			1.00000000	110.523
35	L807	221.780582003	9.000000000	CaF2	1.55970990	108.311
	153.071443064	22.790060084			1.00000000	104.062
L808	309.446967518	38.542735318		CaF2	1.55970990	104.062
	-2660.227900099	0.100022286			1.00000000	104.098
40	L809	23655.354584194	12.899131182	CaF2	1.55970990	104.054
	-1473.189213176	9.318886362			1.00000000	103.931
L810	-652.136459374	16.359499814		CaF2	1.55970990	103.644
	-446.489459129	0.100000000			1.00000000	103.877
L811	174.593507050	25.900313780		CaF2	1.55970990	99.267
	392.239615259AS	14.064505431			1.00000000	96.610
45		0.000000000	2.045119392		1.00000000	96.552
L812	7497.306838492	16.759051656		CaF2	1.55970990	96.383
	318.210831711	8.891640764			1.00000000	94.998
L813	428.724465129	41.295806263		CaF2	1.55970990	95.548
	3290.097860119AS	7.377912006			1.00000000	95.040
50	L814	721.012739719	33.927118706	CaF2	1.55970990	95.443
	-272.650872353	6.871397517			1.00000000	95.207
L815	131.257556743	38.826450065		CaF2	1.55970990	81.345
	632.112566477AS	4.409527396			1.00000000	74.847
55	L816	342.127616157AS	37.346293509	CaF2	1.55970990	70.394
	449.261078744	4.859754445			1.00000000	54.895
L817	144.034814702	34.792179308		CaF2	1.55970990	48.040
	-751.263321098AS	11.999872684			1.00000000	33.475
0'	0.000000000	0.000127776			1.00000000	16.430

5

ASPHÄERISCHE KONSTANTEN

Asphäre der Linse L801

10 K 0.0000
 C1 4.90231706e-009
 C2 3.08634889e-014
 C3 -9.53005325e-019
15 C4 -6.06316417e-024
 C5 6.11462814e-028
 C6 -8.64346302e-032
 C7 0.00000000e+000
 C8 0.00000000e+000
20 C9 0.00000000e+000

Asphäre der Linse L803

25 K 0.0000
 C1 -5.33460884e-009
 C2 9.73867225e-014
 C3 -3.28422058e-018
 C4 1.50550421e-022
30 C5 0.00000000e+000
 C6 0.00000000e+000
 C7 0.00000000e+000
 C8 0.00000000e+000
 C9 0.00000000e+000
35

Asphäre der Linse L803'

40 K 0.0000
 C1 5.33460884e-009
 C2 -9.73867225e-014
 C3 3.28422058e-018
 C4 -1.50550421e-022
 C5 0.00000000e+000
45 C6 0.00000000e+000
 C7 0.00000000e+000
 C8 0.00000000e+000
 C9 0.00000000e+000

50

Asphäre der Linse L805

K 0.0000
C1 2.42569449e-009
55 C2 3.96137865e-014
 C3 -2.47855149e-018
 C4 7.95092779e-023
 C5 0.00000000e+000
 C6 0.00000000e+000

C7 0.00000000e+000
C8 0.00000000e+000
C9 0.00000000e+000

5

Asphäre der Linse L806

10 K 0.0000
C1 -6.74111232e-009
C2 -2.57289693e-014
C3 -2.81309020e-018
15 C4 6.70057831e-023
C5 5.06272344e-028
C6 -4.81282974e-032
C7 0.00000000e+000
C8 0.00000000e+000
20 C9 0.00000000e+000

Asphäre der Linse L811

25 K 0.0000
C1 2.28889624e-008
C2 -1.88390559e-014
C3 2.86010656e-017
C4 -3.18575336e-021
30 C5 1.45886017e-025
C6 -1.08492931e-029
C7 0.00000000e+000
C8 0.00000000e+000
C9 0.00000000e+000
35

Asphäre der Linse L813

40 K 0.0000
C1 3.40212872e-008
C2 -1.08008877e-012
C3 4.33814531e-017
C4 -7.40125614e-021
C5 5.66856812e-025
45 C6 0.00000000e+000
C7 0.00000000e+000
C8 0.00000000e+000
C9 0.00000000e+000
50

Asphäre der Linse L815

K 0.0000
C1 -3.15395039e-008
55 C2 4.30010133e-012
C3 3.11663337e-016
C4 -3.64089769e-020
C5 1.06073268e-024
C6 0.00000000e+000

C7 0.00000000e+000
C8 0.00000000e+000
C9 0.00000000e+000

5

10

Asphäre der Linse L816

K 0.0000
15 C1 -2.16574623e-008
C2 -6.67182801e-013
C3 4.46519932e-016
C4 -3.71571535e-020
C5 0.00000000e+000
20 C6 0.00000000e+000
C7 0.00000000e+000
C8 0.00000000e+000
C9 0.00000000e+000

25

Asphäre der Linse L817

K 0.0000
30 C1 2.15121397e-008
C2 -1.65301726e-011
C3 -5.03883747e-015
C4 1.03441815e-017
C5 -6.29122773e-021
C6 1.44097714e-024
35 C7 0.00000000e+000
C8 0.00000000e+000
C9 0.00000000e+000

40

Patentansprüche:

1. Objektiv (611, 711), insbesondere ein Projektionsobjektiv für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage (81), mit einer Mehrzahl von Linsen (L601-L630, L801-L817), mit mindestens einer Linse (1) aus Fluorid-Kristall, dadurch gekennzeichnet,
daß die mindestens eine Linse (1) eine (100)-Linse mit einer Linsenachse (EA) ist, welche annähernd senkrecht auf den {100}-Kristallebenen oder auf den dazu äquivalenten Kristallebenen des Fluorid-Kristalls steht.
- 10 2. Objektiv nach Anspruch 1, wobei die (100)-Linse eine rotationssymmetrische Linse mit einer Symmetriearchse ist und die Symmetriearchse mit der Linsenachse der (100)-Linse zusammenfällt.
3. Objektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 2 mit einer optischen Achse (OA), wobei die Linsenachse der (100)-Linse mit der optischen Achse des Objektivs zusammenfällt.
- 15 4. Objektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei innerhalb des Objektives Lichtstrahlen von einer Objektebene (O) zu einer Bildebene (O') verlaufen und mindestens ein Lichtstrahl (609, 713, 715) innerhalb der (100)-Linse einen Strahlwinkel bezüglich der Linsenachse aufweist, der größer als 25°, insbesondere größer als 30° ist.
- 20 5. Objektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei innerhalb des Objektives Lichtstrahlen von einer Objektebene zu einer Bildebene verlaufen und alle Lichtstrahlen innerhalb der (100)-Linse Strahlwinkel bezüglich der Linsenachse aufweisen, die maximal 45°, insbesondere maximal $\arcsin\left(\frac{NA}{n_{FK}}\right)$ betragen, wobei NA die bildseitige numerische Apertur bezeichnet und n_{FK} die Brechzahl des Fluorid-Kristalls.
- 25 6. Objektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 5 mit einer Blendenebene, wobei die Blendenebene einen Blendendurchmesser aufweist und wobei die (100)-Linse einen Linsendurchmesser aufweist und wobei der Linsendurchmesser kleiner als 85%, insbesondere kleiner als 80% des Blendendurchmessers ist.
- 30 7. Objektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 6 mit einer Bildebene, wobei die (100)-Linse (L630, L817) die der Bildebene nächste Linse ist.

8. Objektiv (611, 711), insbesondere Projektionsobjektiv für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage,
mit mindestens zwei Linsen oder Linsenteilen aus Fluorid-Kristall,
wobei die Linsen oder die Linsenteile Lisenachsen aufweisen, welche jeweils an-
nähernd in eine Hauptkristallrichtung weisen,
5 wobei auf einen Bildpunkt in einer Bildebene ein Strahlbüschel mit Strahlen trifft,
welche jeweils einen Azimutwinkel α_R , einen Öffnungswinkel θ_R und einen opti-
schen Wegunterschied ΔOPL für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisations-
zustände aufweisen,
10 dadurch gekennzeichnet,
daß die Linsen oder die Linsenteile gegeneinander um die Lisenachsen derart ver-
dreht angeordnet sind, daß die Verteilung der optischen Wegunterschiede
 $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ des Strahlbüschels als Funktion des Azimutwinkels α_R und des Öff-
nungswinkels θ_R wesentlich reduzierte Werte aufweist im Vergleich zu Linsen oder
15 Linsenteilen, deren Lisenachsen in die gleiche Hauptkristallrichtung weisen und
die nicht gegeneinander um die Lisenachsen verdreht angeordnet sind.
9. Objektiv nach Anspruch 8, wobei die optischen Wegunterschiede ΔOPL als Funkti-
on des Azimutwinkels α_R für einen vorgegebenen Öffnungswinkel θ_0 weniger als
30%, insbesondere weniger als 20% variieren.
- 20 10. Objektiv nach einem der Ansprüche 8 oder 9, wobei die Linsen oder Linsenteile
jeweils eine Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$ aufweisen, deren Doppelbre-
chungswerte Δn von Azimutwinkeln α_L bezüglich einer zur Lisenachse senkrecht
stehenden Bezugsrichtung und von Öffnungswinkeln θ_R bezüglich der Lisenachse
abhängen,
- 25 wobei die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$ eine k-zählig Azimutalsymmetrie
aufweist,
wobei zwischen den Bezugsrichtungen der einzelnen Linsen oder Linsenteile Dreh-
winkel γ definiert sind,
wobei eine Anzahl von n Linsen oder n Linsenteilen eine Gruppe bilden, innerhalb
30 derer die Lisenachsen in die gleiche Hauptkristallrichtung oder eine dazu äquiva-
lente Hauptkristallrichtung weisen und innerhalb der die Doppelbrechungsverteilun-

gen $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$ bezüglich der Bezugsrichtungen den gleichen azimutalen Verlauf aufweisen,

wobei für den Drehwinkel γ zwischen je zwei Linsen oder Linsenteilen einer Gruppe gilt:

$$5 \quad \gamma = \frac{360^\circ}{k \cdot n} + m \cdot \frac{360^\circ}{k} \pm 10^\circ,$$

wobei m eine ganze Zahl ist.

- 11. Objektiv nach Anspruch 10, wobei ein äußerster Aperturstrahl (609, 713, 715) des Strahlbüschels innerhalb der Linsen oder Linsenteile jeweils einen Öffnungswinkel θ_L aufweist und wobei die Öffnungswinkel θ_L innerhalb der Linsen oder Linsenteile der Gruppe maximal um 30%, insbesondere maximal um 20% variieren.
- 10
- 12. Objektiv nach einem der Ansprüche 10 oder 11, wobei ein äußerster Aperturstrahl (609, 713, 715) des Strahlbüschels innerhalb der Linsen oder Linsenteile jeweils einen Strahlweg RL_L zurücklegt und wobei die Strahlwege RL_L innerhalb der Linsen oder Linsenteile der Gruppe maximal um 30%, insbesondere maximal um 20% variieren.
- 15
- 13. Objektiv nach einem der Ansprüche 10 bis 12, wobei die bei Drehwinkel $\gamma = 0^\circ$ für die einzelnen Linsen oder Linsenteile einer Gruppe bestimmten optischen Wegunterschiede ΔOPL für einen äußersten Aperturstrahl (609, 713, 715) des Strahlbüschels maximal um 30%, insbesondere maximal um 20% variieren.
- 20
- 14. Objektiv nach einem der Ansprüche 10 bis 13, wobei die Gruppe 2 bis 4 Linsen oder Linsenteile umfaßt.
- 15. Objektiv nach Anspruch 14, wobei die Linsen (L629, L630) oder Linsenteile benachbart angeordnet sind, insbesondere aneinander angesprengt sind.
- 16. Objektiv nach einem der Ansprüche 10 bis 15, wobei das Objektiv mindestens zwei Gruppen mit jeweils gegeneinander verdrehten Linsen oder Linsenteilen aufweist.
- 25
- 17. Objektiv nach einem der Ansprüche 8 bis 16, wobei die Linsenachsen in die <111>-Kristallrichtung oder dazu äquivalente Hauptkristallrichtungen weisen und die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$ der Linsen oder Linsenteile eine 3-zählige Azimutalsymmetrie aufweist.
- 30
- 18. Objektiv nach einem der Ansprüche 8 bis 16, wobei die Linsenachsen in die <100>-Kristallrichtung oder dazu äquivalente Hauptkristallrichtungen weisen und die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$ der Linsen oder Linsenteile eine 3-zählige Azimutalsymmetrie aufweist.

pelbrechungsverteilung $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$ der Linsen oder Linsenteile eine 4-zählige Azimutalsymmetrie aufweist.

19. Objektiv nach einem der Ansprüche 8 bis 16, wobei die Linsenachsen in die <110>-Kristallrichtung oder dazu äquivalente Hauptkristallrichtungen weisen und die Dop-

5 pelbrechungsverteilung $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$ der Linsen oder Linsenteile eine 2-zählige Azimutalsymmetrie aufweist.

20. Objektiv nach einem der Ansprüche 8 bis 19, wobei die Linsenachsen der Linsen oder Linsenteile einer ersten Gruppe in die <100>-Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen und die Linsenachsen der Linsen oder Lin-

10 seneite einer zweiten Gruppe in die <111>-Kristallrichtung oder in eine dazu äqui-

valente Hauptkristallrichtung weisen.

21. Objektiv nach einem der Ansprüche 8 bis 19, wobei die Linsenachsen der Linsen oder Linsenteile einer ersten Gruppe in die <100>-Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen und die Linsenachsen der Linsen oder Lin-

15 seneite einer zweiten Gruppe in die <110>-Kristallrichtung oder in eine dazu äqui-

valente Hauptkristallrichtung weisen.

22. Objektiv nach Anspruch 20 oder 21, wobei sich die Verteilung der optischen Weg-

unterschiede $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ aus einer ersten Verteilung der optischen Wegunter-

schiede $\Delta OPL_1(\alpha_R, \theta_R)$, welche durch die Linsen oder Linsenteile von allen ersten

20 Gruppen hervorgerufen wird, und einer zweiten Verteilung der optischen Wegunter-

schiede $\Delta OPL_2(\alpha_R, \theta_R)$, welche durch die Linsen oder Linsenteile von allen zweiten

Gruppen hervorgerufen wird, zusammensetzt und sich der Betrag des Maximalwerts

der ersten Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL_1(\alpha_R, \theta_R)$ maximal um

30 30%, insbesondere maximal um 20% vom Betrag des Maximalwertes der zweiten

Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL_2(\alpha_R, \theta_R)$ unterscheidet.

23. Objektiv (611) nach einem der Ansprüche 8 bis 22, wobei die Linsen oder Linsen-

teile zu einer Vielzahl von optischen Elementen mit optischen Flächen gehören, und

wobei mindestens eine optische Fläche mit einer Kompensations-Beschichtung

(613) belegt ist, wobei die Kompensations-Beschichtung derart ausgelegt ist, daß

die Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ des Strahlbüschels als

Funktion des Azimutwinkels α_R und des Öffnungswinkels θ_R wesentlich reduzierte

Werte aufweist im Vergleich zu einem Objektiv ohne eine Kompensations-Beschichtung.

24. Objektiv (611) nach Anspruch 23, wobei das optische Element mit der Kompensations-Beschichtung eine Elementachse aufweist, und wobei die Kompensations-

5 Beschichtung eine effektive Doppelbrechungsverteilung aufweist, deren effektive Doppelbrechungswerte von Azimutwinkeln α_F bezüglich einer zur Elementachse senkrecht stehenden Bezugsrichtung und von Öffnungswinkeln θ_F bezüglich der Elementachse abhängen.

25. Objektiv nach Anspruch 24, wobei die effektive Doppelbrechungsverteilung der

10 Kompensations-Beschichtung für den Öffnungswinkel $\theta_F=0^\circ$ annähernd Null ist.

26. Objektiv nach einem der Ansprüche 24 und 25, wobei die effektive Doppelbrechungsverteilung primär nur vom Öffnungswinkel θ_F abhängt.

27. Objektiv nach einem der Ansprüche 23 bis 26, wobei das optische Element mit der

Kompensations-Beschichtung eine der Linsen aus Fluorid-Kristall ist, und wobei die

15 Elementachse die Linsenachse der Linse aus Fluorid-Kristall ist.

28. Objektiv nach einem der Ansprüche 23 bis 27, wobei mehrere optische Elemente mit Kompensations-Beschichtungen belegt sind.

29. Objektiv nach einem der Ansprüche 23 bis 28, wobei alle optischen Elemente mit Kompensations-Beschichtungen belegt sind.

20 30. Objektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 29, wobei der Fluorid Kristall ein Kalzium-Fluorid-Kristall, ein Strontium-Fluorid-Kristall oder ein Barium-Fluorid-Kristall ist.

31. Objektiv (611), insbesondere Projektionsobjektiv für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage,

25 mit mehreren optischen Elementen, insbesondere Linsen aus Fluorid-Kristall, mit optischen Flächen,

wobei auf einen Bildpunkt in einer Bildebene ein Strahlbüschel mit Strahlen trifft, welche jeweils einen optischen Wegunterschied ΔOPL für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände aufweisen, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens eine optische Fläche mit einer Kompensations-Beschichtung (613) belegt ist, wobei die Kompensations-Beschichtung derart ausgelegt ist, daß die optischen

Wegunterschiede ΔOPL des Strahlbüschels wesentlich reduzierte Werte aufweisen im Vergleich zu einem Objektiv ohne eine Kompensations-Beschichtung.

32. Objektiv nach Anspruch 31, wobei das optische Element mit der Kompensations-Beschichtung eine Elementachse aufweist, und wobei die Kompensations-Beschichtung eine effektive Doppelbrechungsverteilung aufweist, deren effektive Doppelbrechungswerte von Azimutwinkeln α_F bezüglich einer zur Elementachse senkrecht stehenden Bezugsrichtung und von Öffnungswinkeln θ_F bezüglich der Elementachse abhängen.
33. Objektiv nach Anspruch 32, wobei die effektive Doppelbrechungsverteilung der Kompensations-Beschichtung für den Öffnungswinkel $\theta_F=0^\circ$ annähernd Null ist.
34. Objektiv nach einem der Ansprüche 32 und 33, wobei die effektive Doppelbrechungsverteilung der Kompensations-Beschichtung primär vom Öffnungswinkel θ_F abhängt.
35. Objektiv nach einem der Ansprüche 32 bis 36, wobei das optische Element mit der Kompensations-Beschichtung austauschbar ist.
36. Objektiv nach einem der Ansprüche 31 bis 35, wobei mindestens zwei optische Elemente Linsen oder Linsenteile aus Fluorid-Kristall sind, wobei die Linsen oder die Linsenteile Linsenachsen aufweisen,
wobei die Linsen oder die Linsenteile gegeneinander um die Linsenachsen derart verdreht angeordnet sind, daß die Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ des Strahlbüschels als Funktion des Azimutwinkels α_R und des Öffnungswinkels θ_R wesentlich reduzierte Werte aufweist im Vergleich zu Linsen oder Linsenteilen, deren Linsenachsen in die gleiche Hauptkristallrichtung weisen und die nicht gegeneinander um die Linsenachsen verdreht angeordnet sind.
37. Objektiv nach Anspruch 36, wobei die optischen Wegunterschiede ΔOPL als Funktion des Azimutwinkels α_R für einen vorgegebenen Öffnungswinkel θ_0 weniger als 30%, insbesondere weniger als 20% variieren.
38. Objektiv nach einem der Ansprüche 36 oder 37, wobei die Linsen oder Linsenteile jeweils eine Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$ aufweisen, deren Doppelbrechungswerte Δn von Azimutwinkeln α_L bezüglich einer zur Linsenachse senkrecht stehenden Bezugsrichtung und von Öffnungswinkeln θ_R bezüglich der Linsenachse abhängen,

wobei die Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$ eine k-zählig Azimutalsymmetrie aufweist,

wobei zwischen den Bezugsrichtungen der einzelnen Linsen oder Linsenteile Drehwinkel γ definiert sind,

- 5 wobei eine Anzahl von n Linsen oder n Linsenteilen eine Gruppe bilden, innerhalb derer die Linsenachsen in die gleiche Hauptkristallrichtung oder eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen und innerhalb der die Doppelbrechungsverteilungen $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$ bezüglich der Bezugsrichtungen den gleichen azimutalen Verlauf aufweisen,
- 10 wobei für den Drehwinkel γ zwischen je zwei Linsen oder Linsenteilen einer Gruppe gilt:

$$\gamma = \frac{360^\circ}{k \cdot n} + m \cdot \frac{360^\circ}{k} \pm 10^\circ,$$

wobei m eine ganze Zahl ist.

- 39. Objektiv nach einem der Ansprüche 36 bis 38, wobei das optische Element mit der Kompensations-Beschichtung eine der Linsen aus Fluoridkristall ist, und wobei die Elementachse die Linsenachse der Linse aus Fluoridkristall ist.
- 40. Objektiv nach einem der Ansprüche 30 bis 39, wobei mehrere optische Elemente mit Kompensations-Beschichtungen belegt sind.
- 41. Objektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 40, wobei das Objektiv eine bildseitige numerische Apertur NA aufweist und die bildseitige numerische Apertur NA größer als 0.7, insbesondere größer als 0.8 ist.
- 42. Objektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 41, wobei das Objektiv für Wellenlängen kleiner 200nm ausgelegt ist.
- 43. Objektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 42, wobei das Objektiv für Wellenlängen kleiner 160nm ausgelegt ist.
- 44. Objektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 43, wobei das Objektiv (611) ein refraktives Objektiv ist.
- 45. Objektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 44, wobei das Objektiv ein katadioptrisches Objektiv (711) mit Linsen und mindestens einem Spiegel (Sp2) ist.
- 30 46. Objektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 45, wobei alle Linsen aus Kalzium-Fluorid sind.

47. Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage (81), umfassend
ein Beleuchtungssystem (83),
ein Objektiv 85) nach einem der Ansprüche 1 bis 46, das eine Struktur tragende
Maske (89) auf ein lichtempfindliches Substrat (815) abbildet.
- 5 48. Verfahren zur Herstellung von Halbleiter-Bauelementen mit einer Mikrolithogra-
phie-Projektionsbelichtungsanlage (81) nach Anspruch 47.
49. Verfahren zur Herstellung von Objektiven, insbesondere von Projektionsobjektiven
für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage,
mit mindestens zwei Linsen oder Linsenteilen aus Fluorid-Kristall,
- 10 wobei die Linsen oder die Linsenteile Linsenachsen aufweisen, welche jeweils an-
nähernd in eine Hauptkristallrichtung weisen,
dadurch gekennzeichnet,
daß für ein Strahlbüschel mit Strahlen, welche jeweils einen Azimutwinkel α_R , ei-
nen Öffnungswinkel θ_R und einen optischen Wegunterschied ΔOPL für zwei zuein-
ander orthogonale lineare Polarisationszustände in einer Bildebene aufweisen, die
15 Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ für Linsen oder Linsentei-
le bestimmt wird,
daß die Linsen oder die Linsenteile gegeneinander um die Linsenachsen derart ver-
dreht angeordnet werden, daß die Verteilung der optischen Wegunterschiede
20 $\Delta OPL(\alpha_R, \theta_R)$ des Strahlbüschels wesentlich reduzierte Werte aufweist im Vergleich
zu Linsen oder Linsenteilen, deren Linsenachsen in die gleiche Hauptkristallrich-
tung weisen und die nicht gegeneinander um die Linsenachsen verdreht angeordnet
sind.
50. Verfahren nach Anspruch 49, wobei das Objektiv eine erste Gruppe mit Linsen oder
25 Linsenteilen und eine zweite Gruppe mit Linsen oder Linsenteilen aufweist und die
Linsenachsen der Linsen oder Linsenteile der ersten Gruppe in die <100>-
Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen und die
Linsenachsen der Linsen oder Linsenteile der zweiten Gruppe in die <111>-
Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen.
- 30 51. Verfahren nach Anspruch 49, wobei das Objektiv eine erste Gruppe mit Linsen oder
Linsenteilen und eine zweite Gruppe mit Linsen oder Linsenteilen aufweist und die
Linsenachsen der Linsen oder Linsenteile der ersten Gruppe in die <100>-

Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen und die Linsenachsen der Linsen oder Linsenteile der zweiten Gruppe in die <110>-Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen.

52. Verfahren nach einem der Ansprüche 49 bis 51,

5 wobei für ein Strahlbüschel mit Strahlen, welche jeweils einen Azimutwinkel α_R , einen Öffnungswinkel θ_R und einen optischen Wegunterschied ΔOPL für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände in einer Bildebene aufweisen, eine Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL (\alpha_R, \theta_R)$,

10 wobei aus der Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL (\alpha_R, \theta_R)$ eine effektive Doppelbrechungsverteilung einer Kompensations-Beschichtung zur Reduzierung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL (\alpha_R, \theta_R)$ bestimmt wird,

wobei die effektive Doppelbrechungswerte der Kompensations-Beschichtung von Azimutwinkeln α_F bezüglich einer zu einer Elementachse des optischen Elements senkrecht stehenden Bezugsrichtung und von Öffnungswinkeln θ_F bezüglich der Elementachse abhängen,

15 wobei aus der Doppelbrechungsverteilung der Aufbau einer Kompensations-Beschichtung bestimmt wird, und

wobei ein optisches Element des Objektivs mit der Kompensations-Beschichtung belegt wird.

20 53. Verfahren zur Kompensation von Doppelbrechungs-Effekten in Objektiven, insbesondere in Projektionsobjektiven für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage, wobei das Objektiv mehrere optische Elemente, insbesondere Linsen aus Fluorid-Kristall, mit optischen Flächen aufweist, wobei mindestens ein optisches Element austauschbar ist,

25 wobei auf einen Bildpunkt in einer Bildebene ein Strahlbüschel mit Strahlen trifft, welche jeweils einen Azimutwinkel α_R , einen Öffnungswinkel θ_R und einen optischen Wegunterschied ΔOPL für zwei zueinander orthogonale lineare Polarisationszustände in einer Bildebene aufweisen,

30 wobei eine Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL (\alpha_R, \theta_R)$ bestimmt wird, wobei aus der Verteilung der optischen Wegunterschiede $\Delta OPL (\alpha_R, \theta_R)$ eine effektive Doppelbrechungsverteilung einer Kompensations-Beschichtung bestimmt wird, deren effektive Doppelbrechungswerte von Azimutwinkeln α_F bezüglich einer

- zu einer Elementachse des optischen Elements senkrecht stehenden Bezugsrichtung und von Öffnungswinkeln θ_F bezüglich der Elementachse abhängen, wobei aus der effektive Doppelbrechungsverteilung der Aufbau einer Kompensations-Beschichtung bestimmt wird,
- 5 wobei das austauschbare optische Element aus dem Objektiv entfernt wird, wobei das austauschbare optische Element mit der Kompensations-Beschichtung belegt wird und wobei das austauschbare optische Element mit der Kompensations-Beschichtung wieder in das Objektiv eingebaut wird.
- 10 54. Linsenherstellverfahren, dadurch gekennzeichnet, daß mehrere Platten aus gegeneinander hinsichtlich der Kristallorientierung verdrehtem Kristallmaterial, vorzugsweise Fluorid-Kristall und insbesondere Kalziumfluorid, optisch nahtlos gefügt, insbesondere angesprengt werden und anschließend als ein einheitliches Blank formgebend bearbeitet und poliert werden.
- 15 55. Linsenherstellverfahren nach Anspruch 54, wobei die Platten jeweils eine Doppelbrechungsverteilung $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$ aufweisen, deren Doppelbrechungswerte Δn von Azimutwinkeln α_L bezüglich einer zur Linsenachse senkrecht stehenden Bezugsrichtung und von Öffnungswinkeln θ_R bezüglich der Linsenachse abhängen und welche eine k-zähliges Azimutalsymmetrie aufweist,
- 20 wobei für eine Anzahl von N Platten die Flächennormalen in die gleiche Hauptkristallrichtung oder eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen und die Doppelbrechungsverteilungen $\Delta n(\alpha_L, \theta_L)$ bezüglich der Bezugsrichtungen den gleichen azimutalen Verlauf aufweisen, wobei zwischen den Bezugsrichtungen der einzelnen Platten Drehwinkel γ definiert
- 25 sind, wobei für den Drehwinkel γ zwischen je zwei Platten gilt:
- $$\gamma = \frac{360^\circ}{k \cdot n} + m \cdot \frac{360^\circ}{k} \pm 10^\circ,$$
- wobei m eine ganze Zahl ist.
56. Linsenherstellverfahren nach Anspruch 55, wobei zwei Platten nahtlos gefügt werden.
- 30 57. Linsenherstellverfahren nach einem der Ansprüche 55 und 56, wobei die Platten annähernd gleiche Dicke aufweisen.

58. Linsenherstellverfahren nach einem der Ansprüche 54 bis 57, wobei bei ersten Platten die Flächennormalen in die <111>-Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen und bei zweiten Platten die Flächennormalen in die <100>-Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen.
- 5 59. Linsenherstellverfahren nach Anspruch 58, wobei die ersten Platten eine annähernd gleiche erste Dicke aufweisen und die zweiten Platten eine annähernd gleiche zweite Dicke aufweisen und das Verhältnis der Summe der ersten Dicken zur Summe der zweiten Dicken 1.5 ± 0.2 ist.
- 10 60. Linsenherstellverfahren nach einem der Ansprüche 54 bis 57, wobei bei ersten Platten die Flächennormalen in die <110>-Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen und bei zweiten Platten die Flächennormalen in die <100>-Kristallrichtung oder in eine dazu äquivalente Hauptkristallrichtung weisen.
- 15 61. Linsenherstellverfahren nach Anspruch 60, wobei die ersten Platten eine annähernd gleiche erste Dicke aufweisen und die zweiten Platten eine annähernd gleiche zweite Dicke aufweisen und das Verhältnis der Summe der ersten Dicken zur Summe der zweiten Dicken 4.0 ± 0.4 ist.
- 20 62. Linsenherstellverfahren nach einem der Ansprüche 60 und 61, wobei zwei erste Platten mit einer zweiten Platte optisch nahtlos gefügt werden.
63. Linsenherstellverfahren nach einem der Ansprüche 60 und 61, wobei vier erste Platten mit zwei zweiten Platte optisch nahtlos gefügt werden.
- 25 64. Linse, gekennzeichnet durch die Herstellung nach einem der Ansprüche 54 bis 63.
65. Objektiv, insbesondere ein Projektionsobjektiv (611, 711) für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage (81), dadurch gekennzeichnet, daß es eine Linse nach Anspruch 64 umfaßt.
- 26 66. Objektiv nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 46, dadurch gekennzeichnet, daß es eine Linse nach Anspruch 64 umfaßt.
- 30 67. Objektiv, insbesondere nach einem der Ansprüche 31 bis 36, bei dem die Kompensations-Beschichtung (510) eine effektive Doppelbrechungsverteilung mit örtlich variierender Doppelbrechung hat.

68. Objektiv nach Anspruch 67, bei dem die Kompensations-Beschichtung eine effektive Doppelbrechungsverteilung hat, die im wesentlichen rotations-symmetrisch zu einer Elementachse des mit der Kompensationsbeschichtung belegten Elementes ist.

5

69. Objektiv nach Anspruch 67 oder 68, bei dem die Kompensations-Beschichtung eine effektive Doppelbrechungsverteilung hat, die eine in Radial-richtung zunehmende oder abnehmende Doppelbrechung hat.

10 70. Objektiv nach einem der Ansprüche 67 oder 69, bei dem die Kompensa-tionsbeschichtung eine effektive Doppelbrechungsverteilung hat, die nicht-rotationssymmetrisch ist, insbesondere mit einer azimutalen Modulation der Stärke der Doppelbrechung, wobei vorzugsweise eine Doppelbrechungsverteilung vorgesehen ist, die in Bezug auf die Elementachse der mit der Beschich-15 tung versehenen optischen Komponente eine mehrzählige Symmetrie aufweist, insbesondere eine 2-zählige, 3-zählige, 4-zählige oder 6-zählige Symmetrie.

20 71. Objektiv nach einem der Ansprüche 67 bis 70, bei dem mindestens eine opti-sche Fläche einer optischen Komponente eine anisotrope Beschichtung auf-weist, die vorzugsweise als Kompensations-Beschichtung ausgelegt ist.

25 72. Objektiv nach Anspruch 71, bei dem die anisotrope Beschichtung eine örtli-che Variation der Anisotropie aufweist, wobei die Variation die Richtung einer Vorzugsrichtung und/oder den Absolutbetrag der durch die Beschichtung er-zeugten Phasenaufspaltung umfasst.

30 73. Verfahren zur Herstellung einer polarisationsoptisch wirksamen Kompo-nente, insbesondere eines Verzögerungselementes, bei dem auf mindestens eine Substratoberfläche eines Substrates eine polarisationsoptisch wirkame Be-schichtung mit einer vorgebbaren effektiven Doppelbrechungsverteilung aufge-bracht wird, mit:

Aufbringen von Beschichtungsmaterial auf mindestens einen Bereich der Substratoberfläche oder eine auf der Substratoberfläche vorhandene Beschichtung unter einem Belegungswinkel, der so groß ist, dass eine anisotrope Beschichtungsstruktur entsteht.

5

74. Verfahren nach Anspruch 73, bei dem zur Steuerung der Doppelbrechungsverteilung und/oder der Anisotropie der Beschichtung folgende Schritte durchgeführt werden:

Rotation des Substrats um eine Substratdrehachse;

10 Beschichtung der Substratoberfläche mit dem Beschichtungsmaterial einer Materialquelle unter großen Beschichtungswinkeln; zeitweise Abschattung des Beschichtungsmaterials während der Rotation des Substrates zur Erzeugung einer von der Radialposition des Beschichtungsortes abhängigen Beschichtungszeit gemäß einem vorgegebenen radialen Zeitprofil.

15

75. Verfahren nach Anspruch 74, bei dem die Abschattung so durchgeführt wird, dass kleine Beschichtungswinkel, insbesondere von < 30° bis 35°, abgeschattet werden, so dass das Material ausschließlich oder zumindest überwiegend unter großen Aufdampfwinkeln, insbesondere von 40° oder mehr, unter

20 ausgewählten Richtungen auf die Substratoberfläche trifft.

76. Verfahren zur Herstellung einer polarisationsoptisch wirksamen Komponente, insbesondere eines Verzögerungselementes, bei dem auf mindestens eine Substratoberfläche eines Substrates eine polarisationsoptisch wirkame Beschichtung mit einer vorgebbaren effektiven Doppelbrechungsverteilung aufgebracht wird, mit:

Veränderung der örtlichen Doppelbrechungsverteilung der Beschichtung nach Abschluss des Beschichtungsvorganges.

30 77. Verfahren nach Anspruch 76, bei dem die Veränderung durch lokale Beaufschlagung der fertigen Beschichtung mit einer zur Veränderung der Morpho-

logie der Beschichtung geeigneten Energie gemäß einer vorgegebenen räumlichen Verteilung durchgeführt wird.

78. Verfahren nach Anspruch 76 oder 77, bei dem die Beschichtung eine anisotrope Beschichtung ist.

79. Verfahren nach einem der Ansprüche 76 bis 78, bei dem eine Festlegung der mit Energie zur beaufschlagenden Bereiche mit Hilfe einer oder mehrerer Masken erfolgt.

10

80. Verfahren nach einem der Ansprüche 76 bis 79, bei dem die Veränderung der örtlichen Doppelbrechungsverteilung der Beschichtung durch lokal begrenzte thermische und/oder mechanische Einwirkung herbeigeführt wird.

15 81. Polarisationsoptisch wirksame optische Komponente, insbesondere Verzögerungselement, hergestellt durch ein Verfahren nach einem der Ansprüche 73 bis 80.

82. Verfahren zur Herstellung eines optischen Systems, insbesondere eines 20 Projektionsobjektivs für die Mikrolithografie, mit folgenden Schritten:

Zusammenbauen des optischen System unter Verwendung mindestens einer Komponente mit einer anisotropen Beschichtung oder einer anderen Nichtgleichgewichts-Beschichtung

Vermessen des optischen Systems zur Ermittlung einer gewünschten effektiven 25 Doppelbrechungsverteilung der mindestens einen Beschichtung, die erforderlich ist, um das optische System polarisationsoptisch abzustimmen;

Ausbauen der mit der Beschichtung versehenen optischen Komponente; nachträgliche Veränderungen der Schichteigenschaften der Beschichtung durch lokale begrenzten Energieeintrag zur Erzeugung der gewünschten effektiven 30 Doppelbrechungsverteilung;

Einbauen der veränderten optischen Komponente.

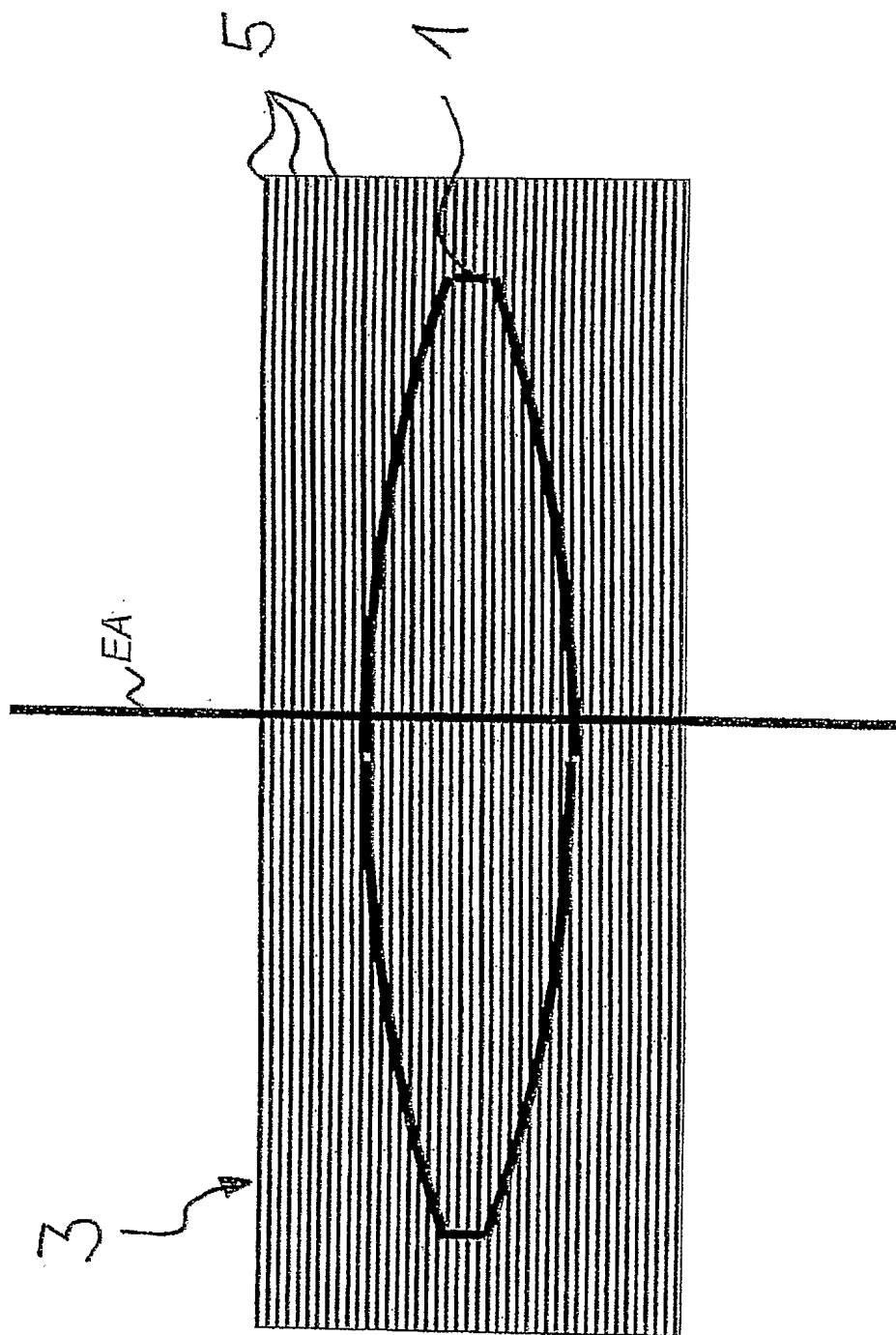


Fig. 1

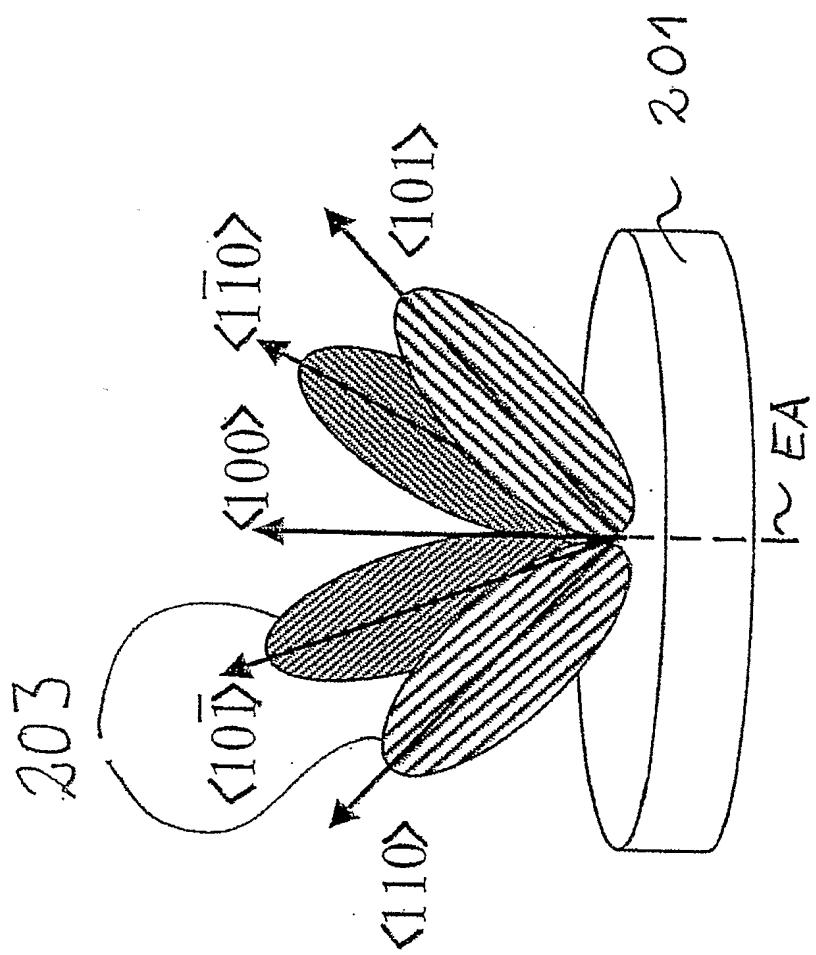


Fig. 2A

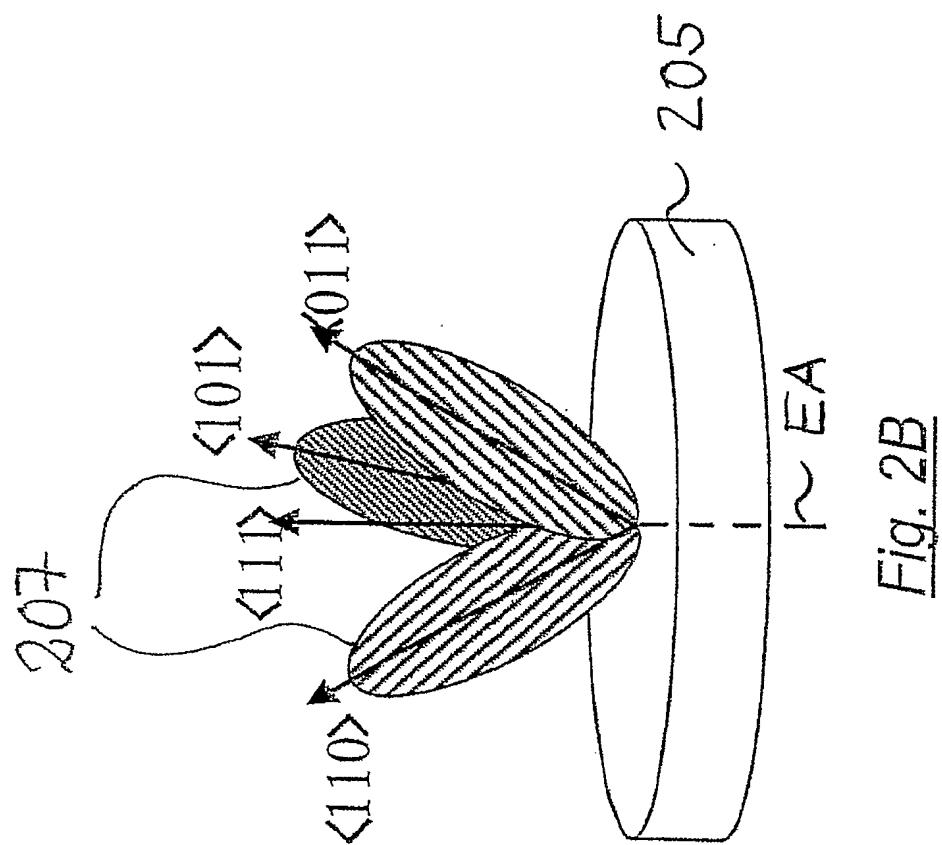


Fig. 2B

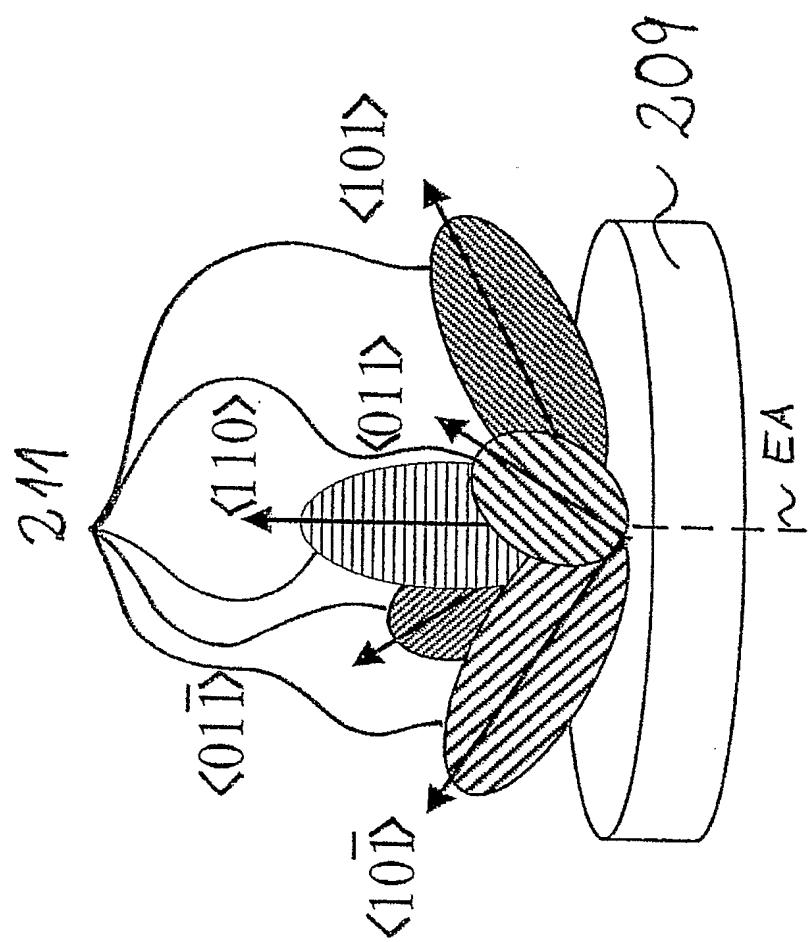


Fig. 2C

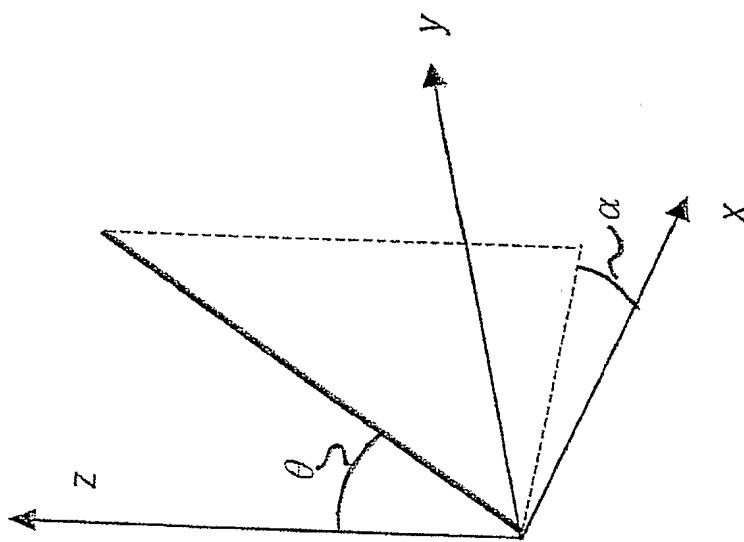


Fig. 3

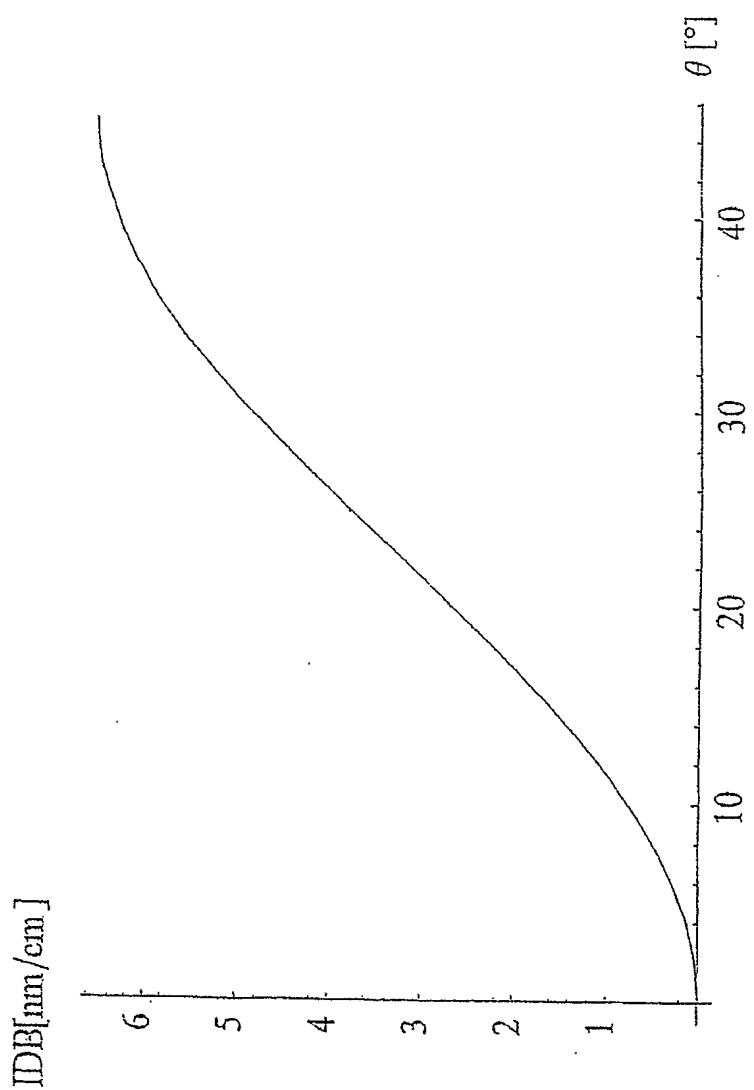


Fig. 4A

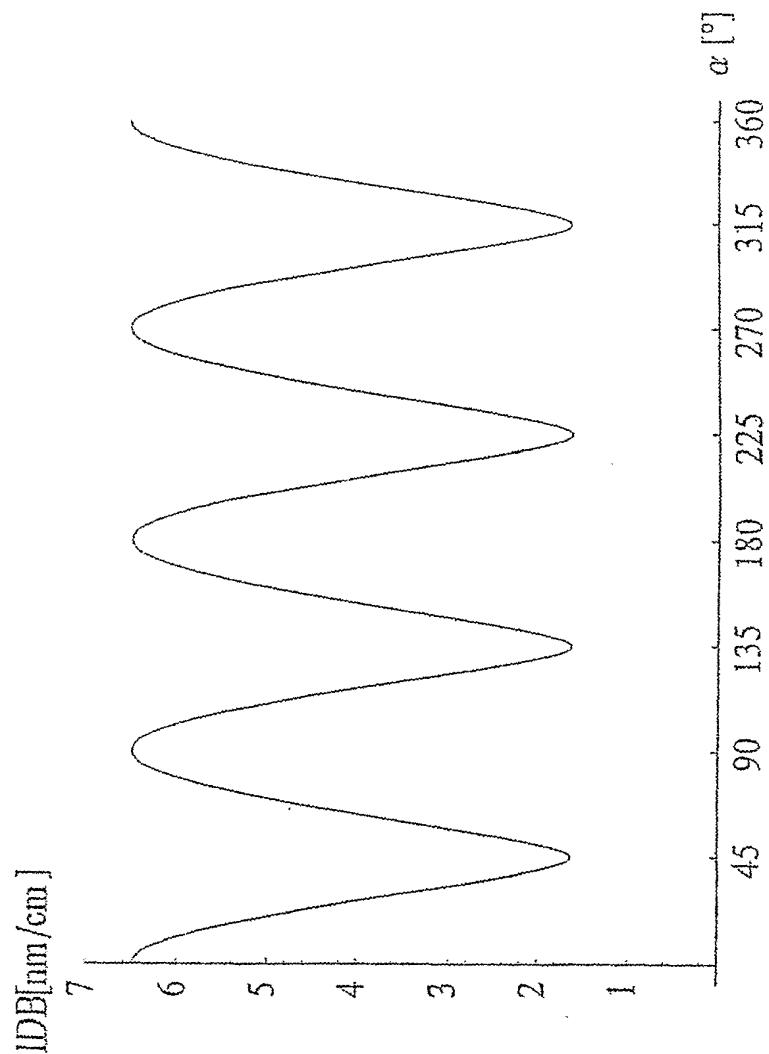


Fig. 4B

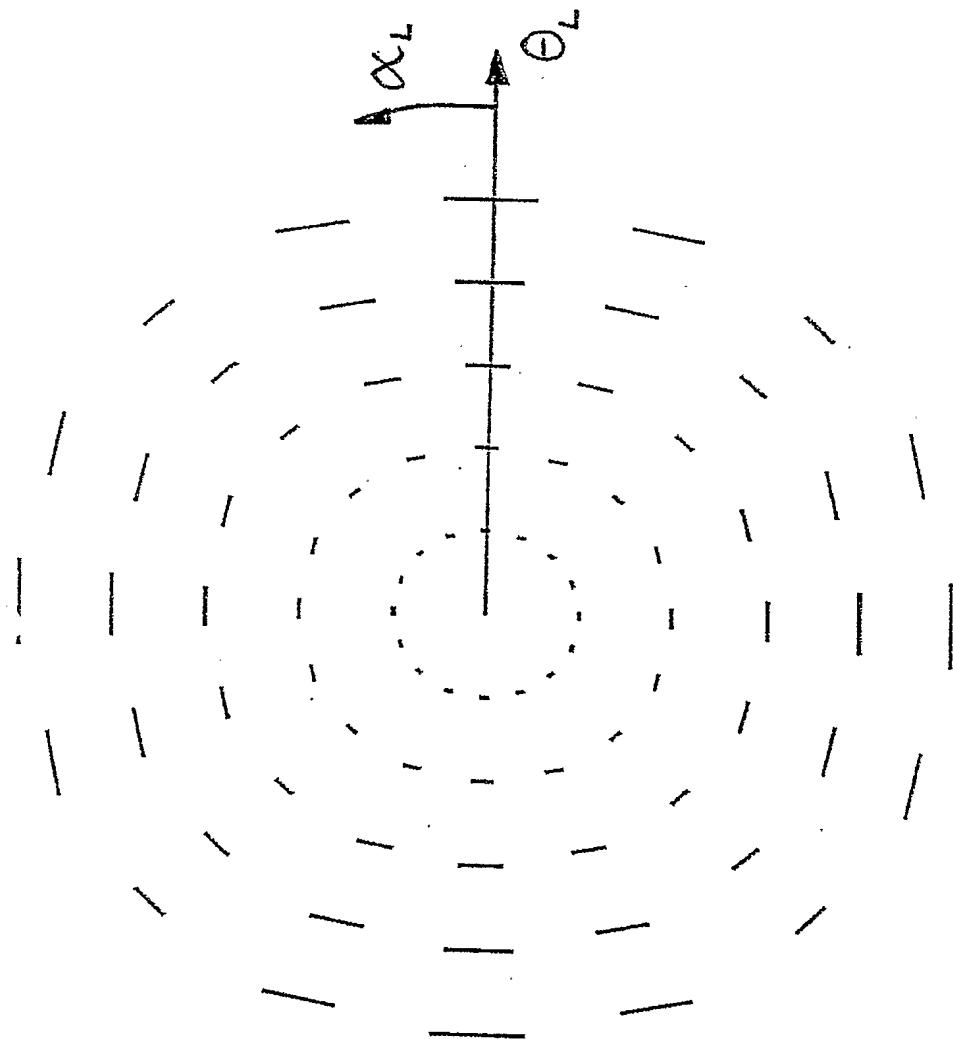


Fig. 4C

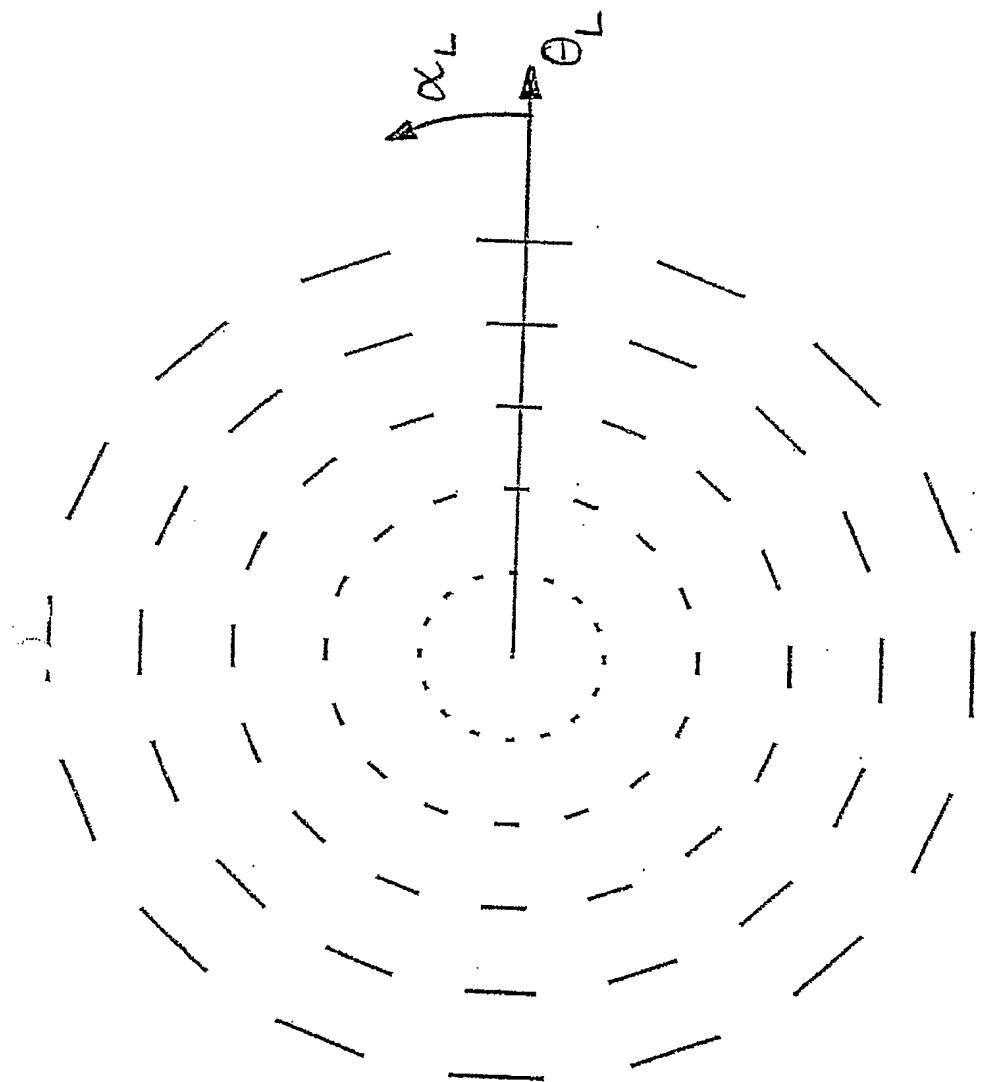


Fig. 4D

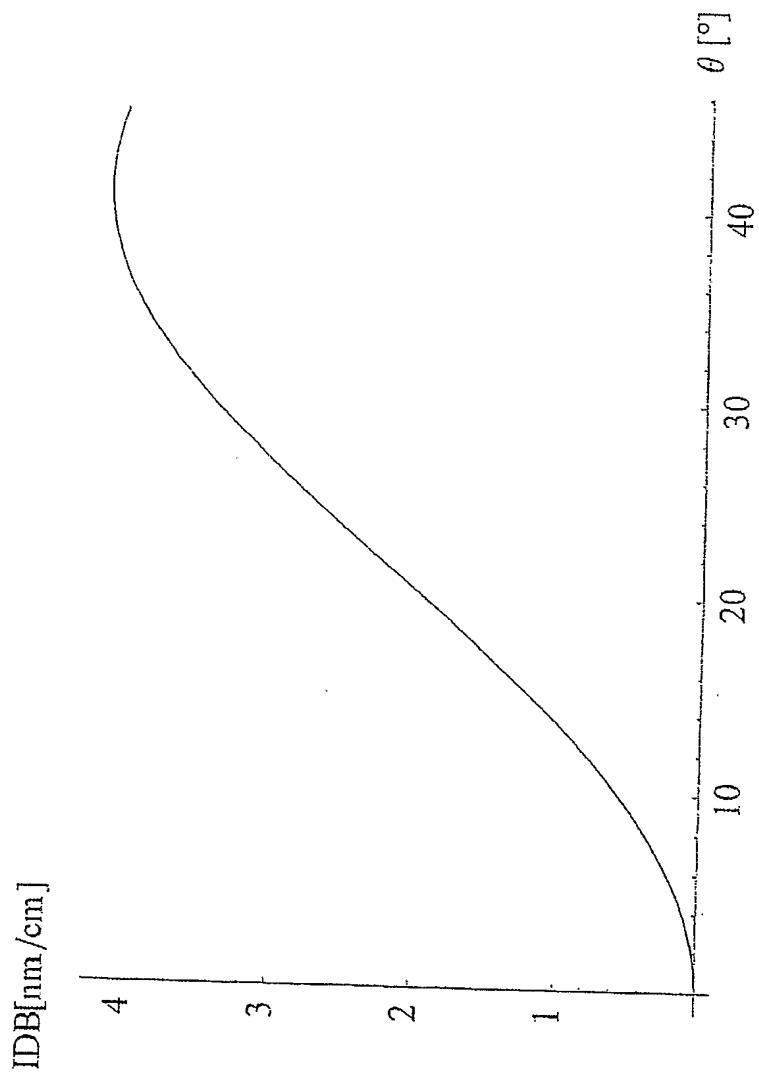


Fig. 4 E

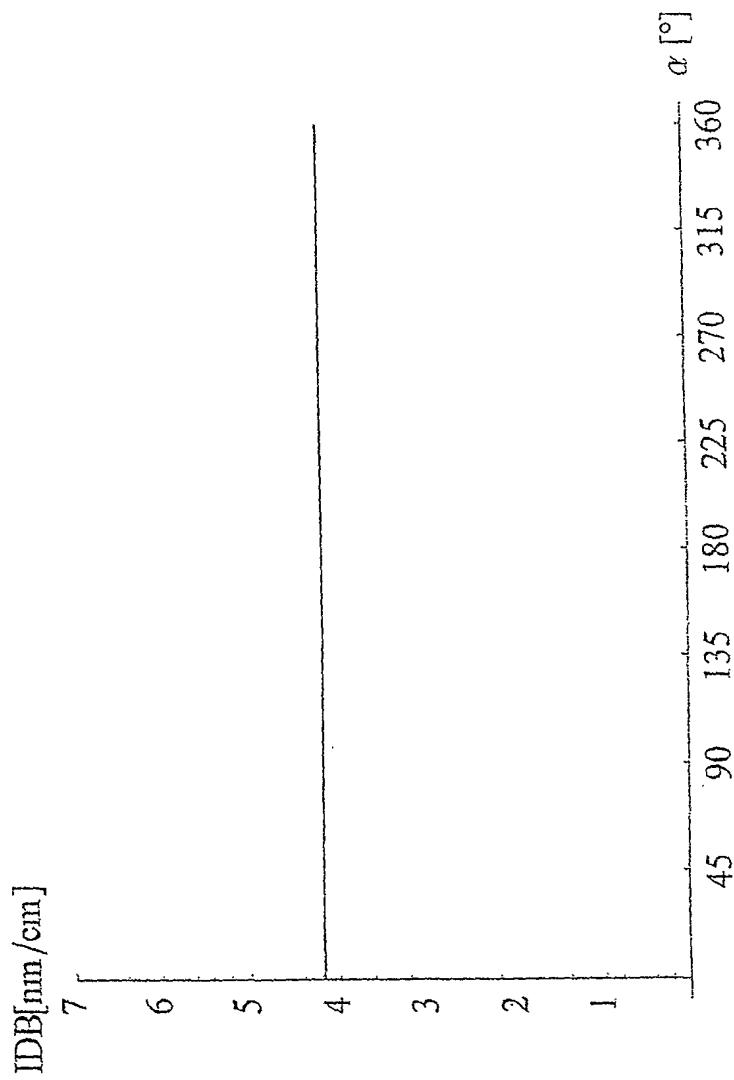


Fig. 4 T

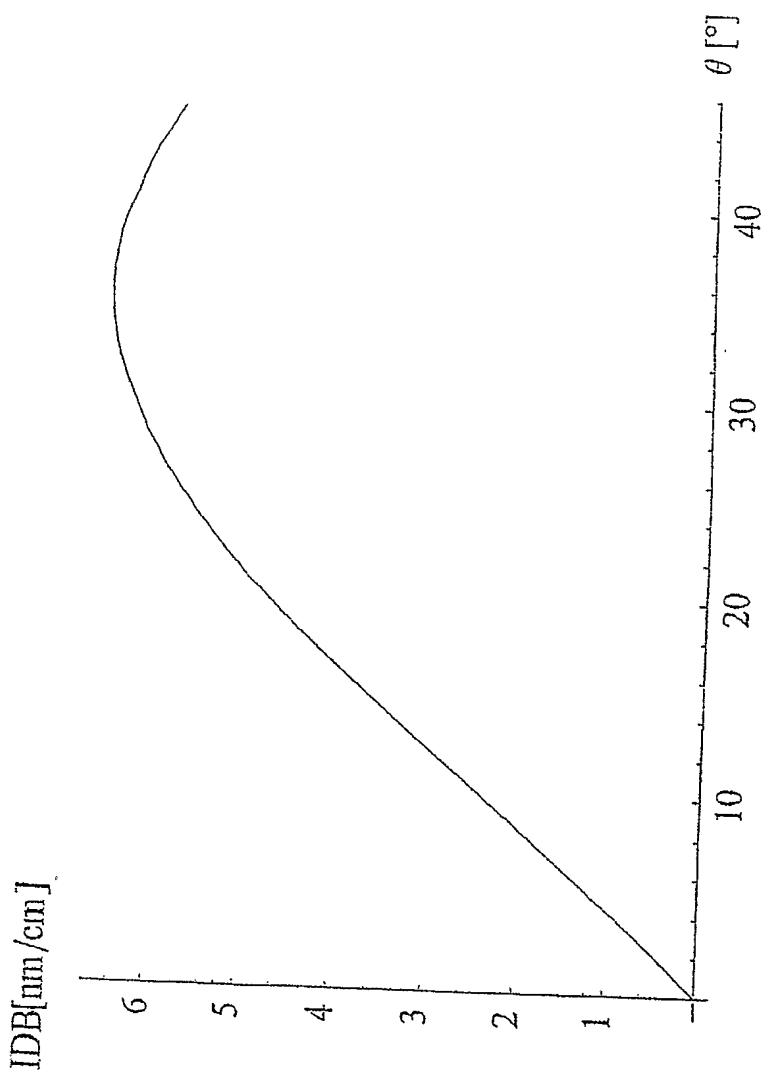


Fig. 5A

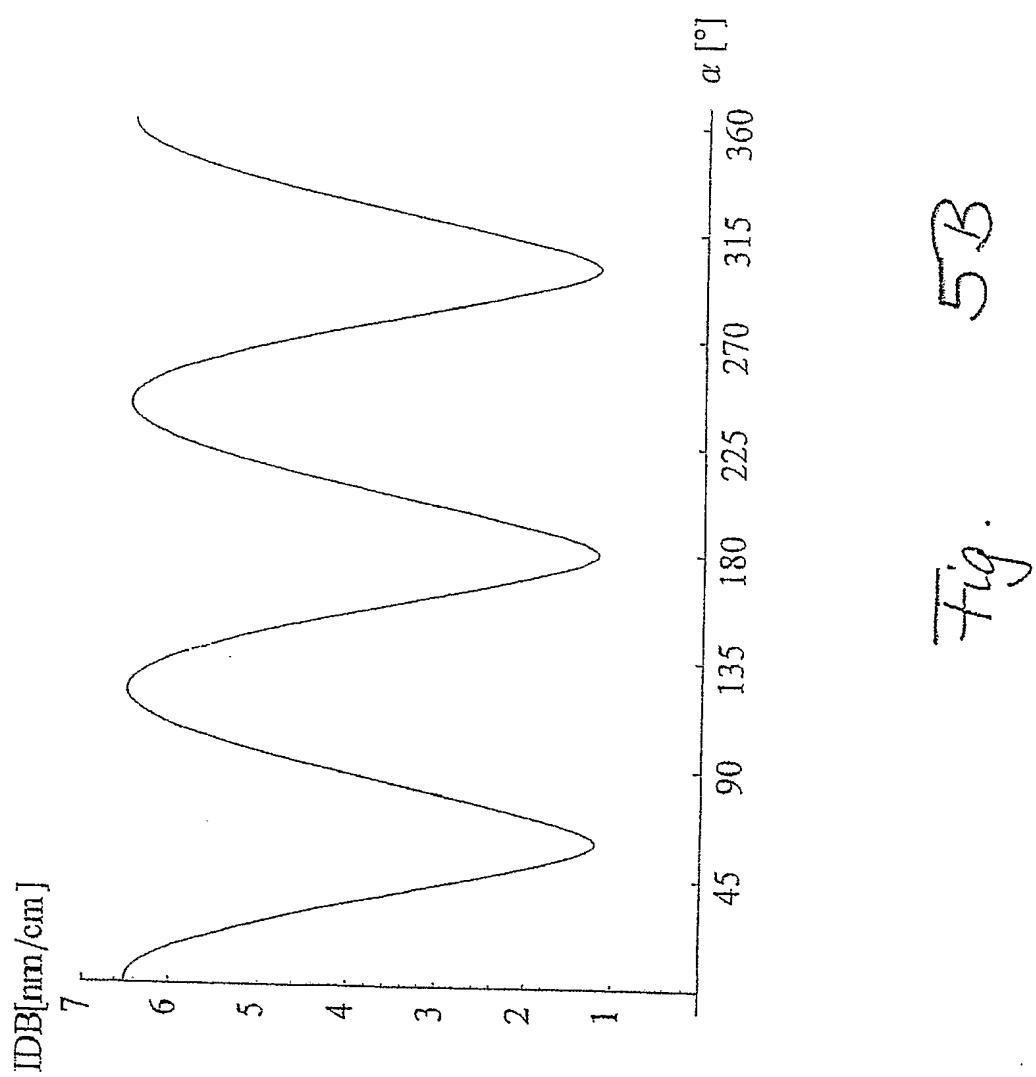


Fig.

5B

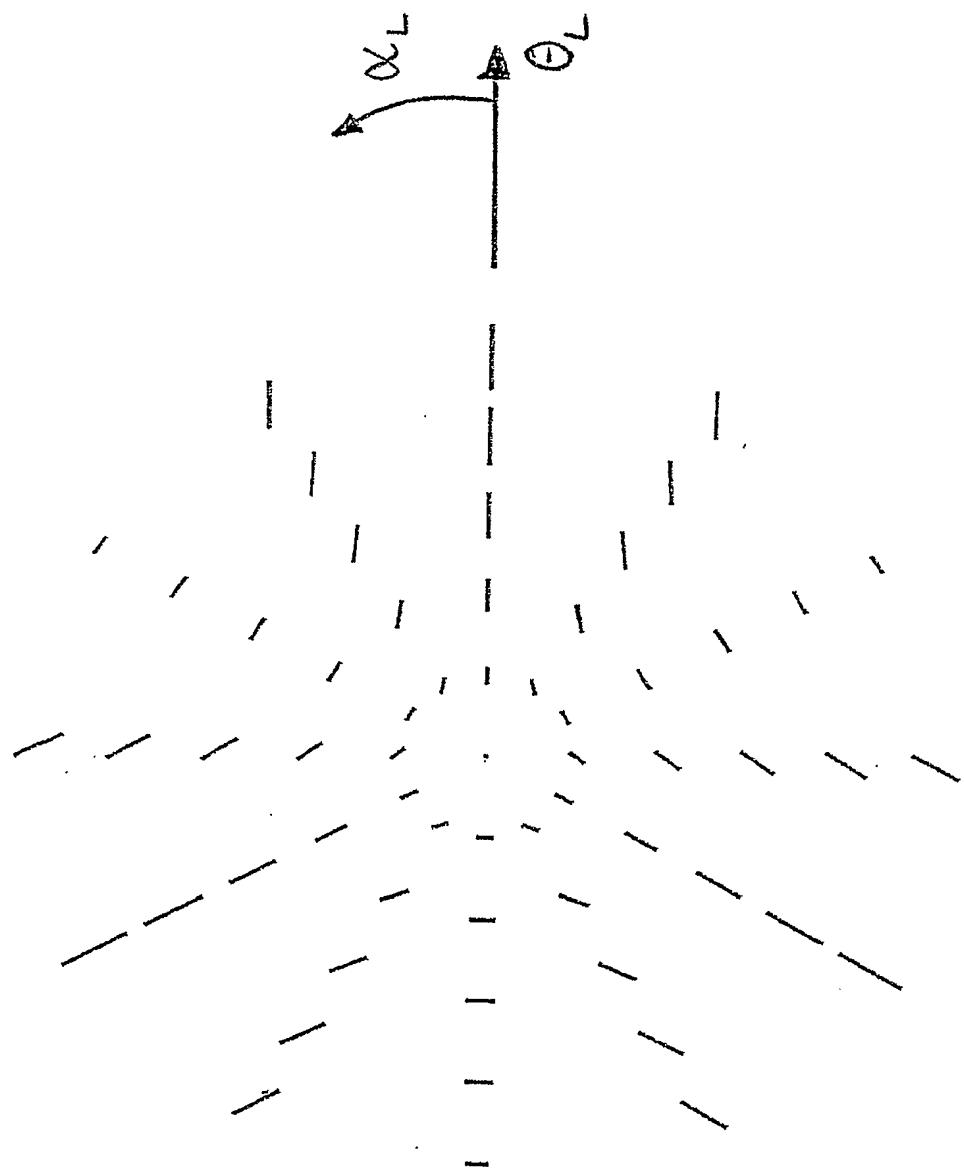


Fig. 5C

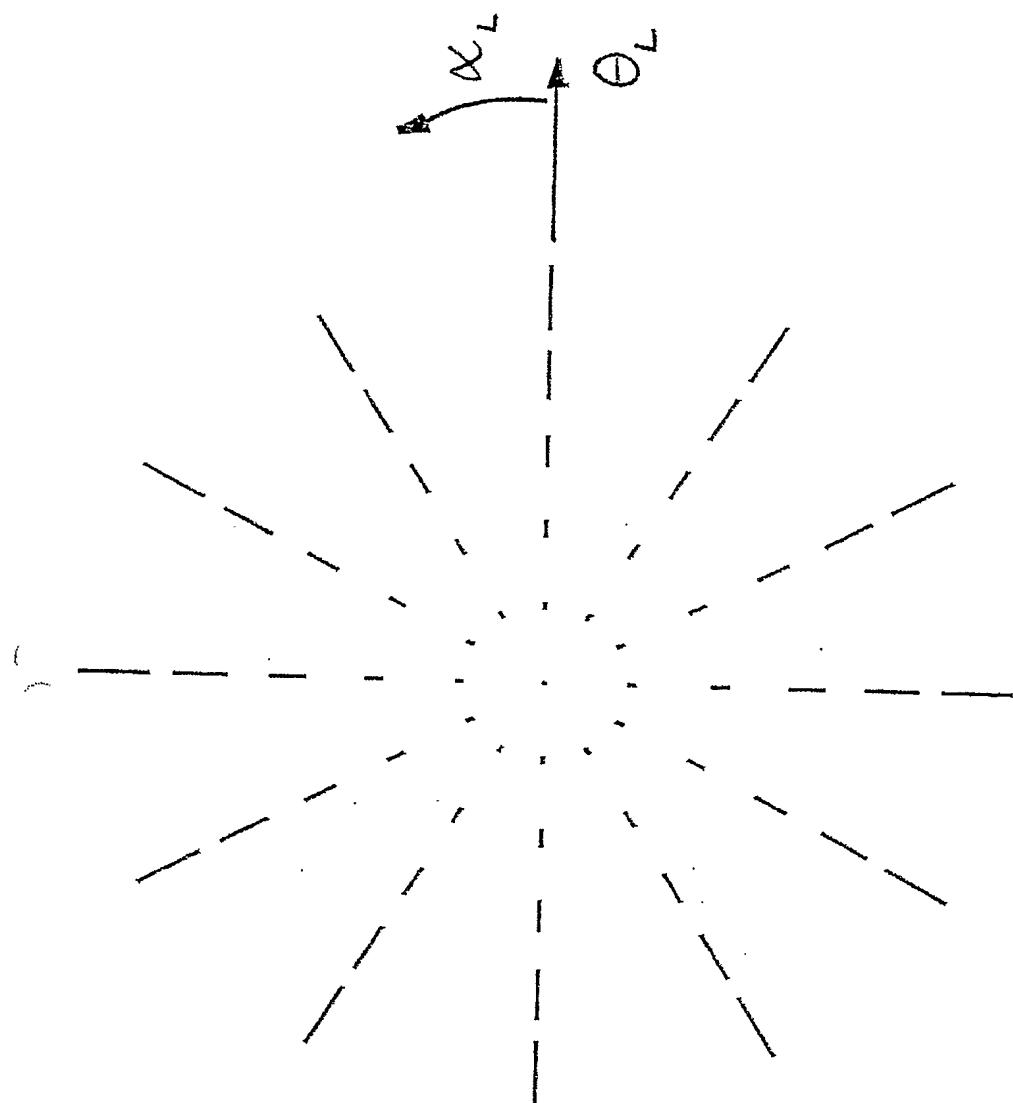


Fig. 5D

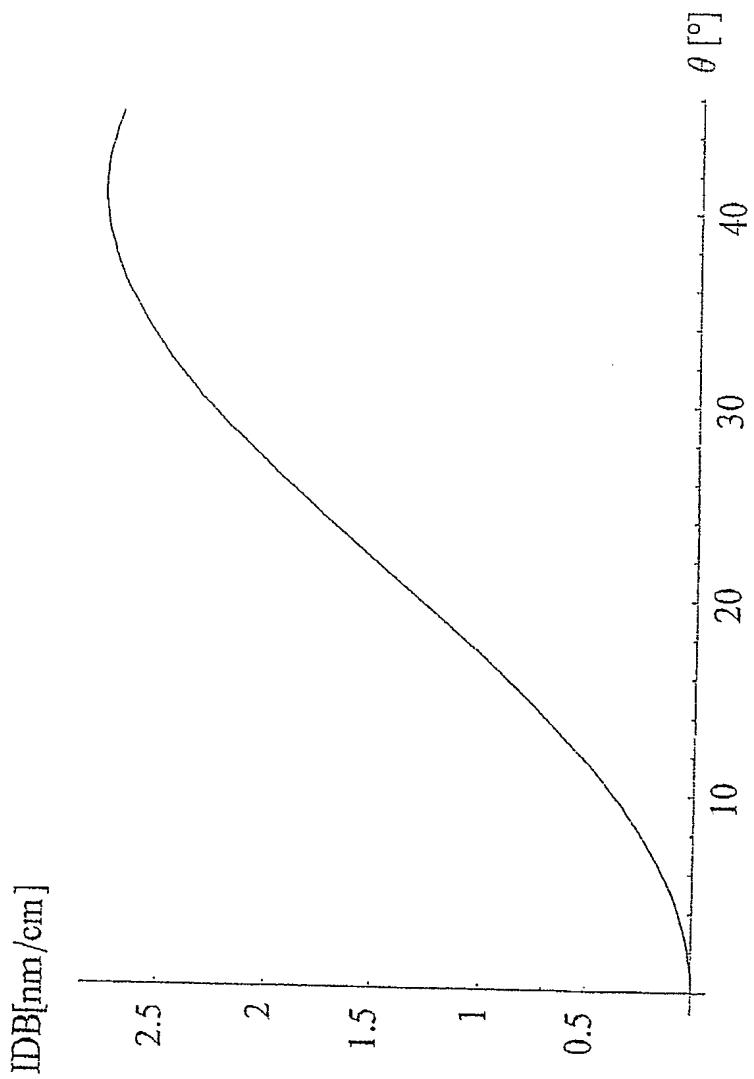


Fig. 5 E

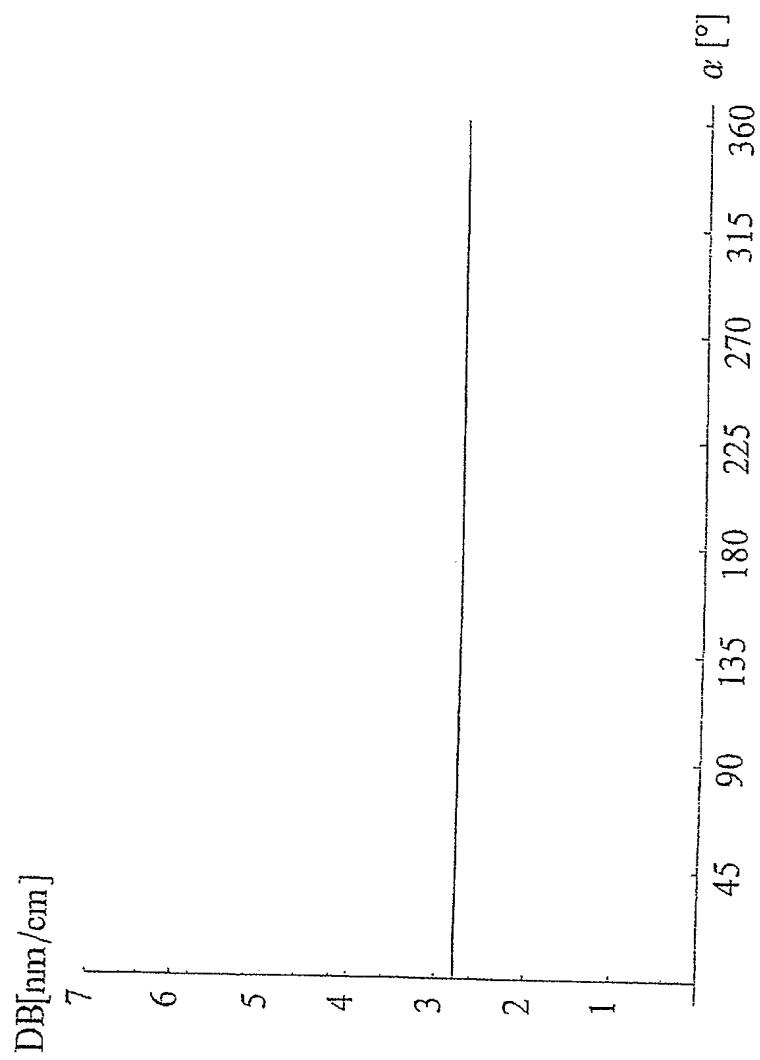


Fig. 5 F

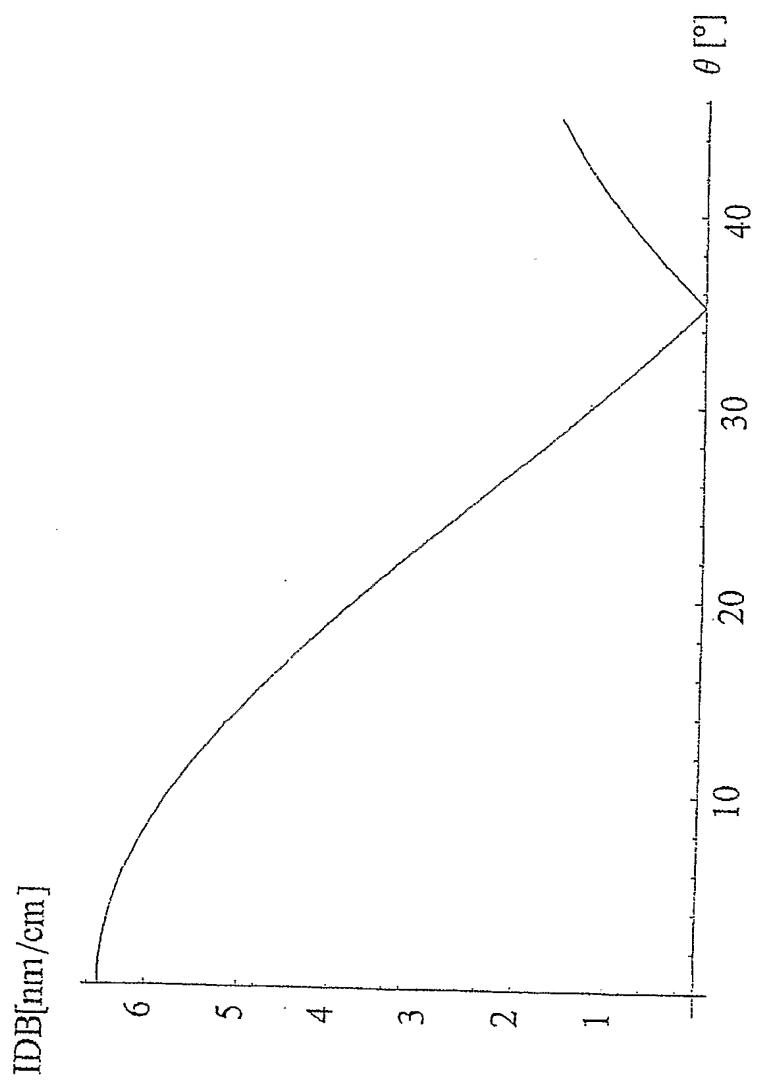


Fig. 6A

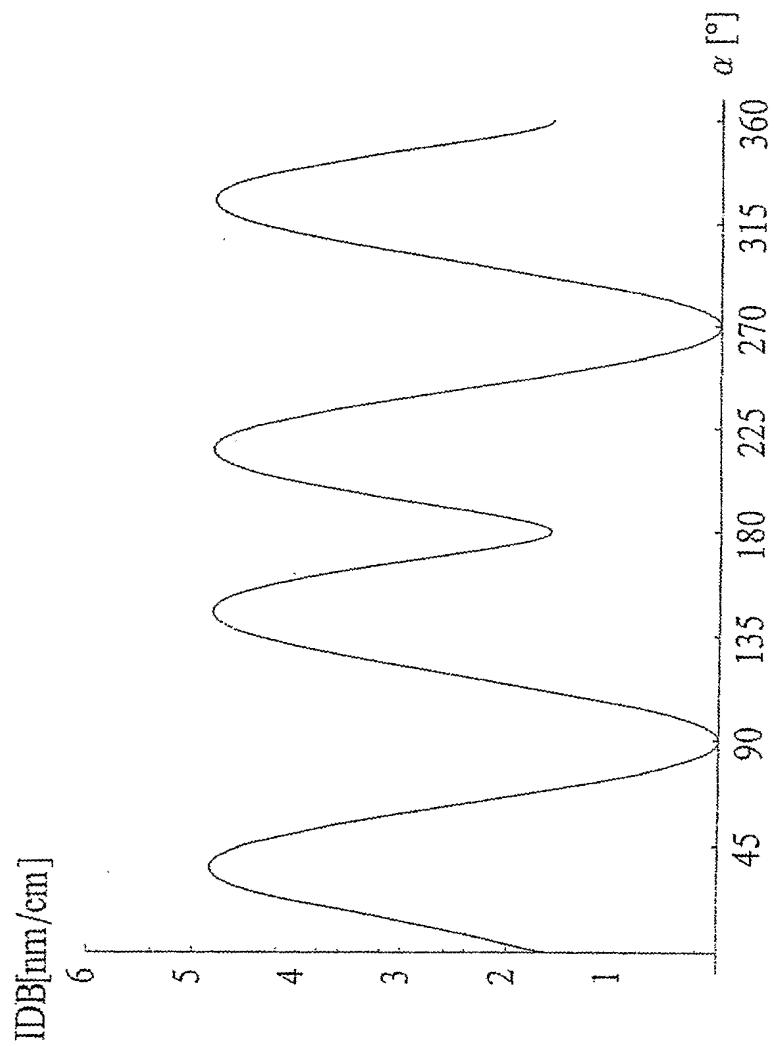


Fig. 6B

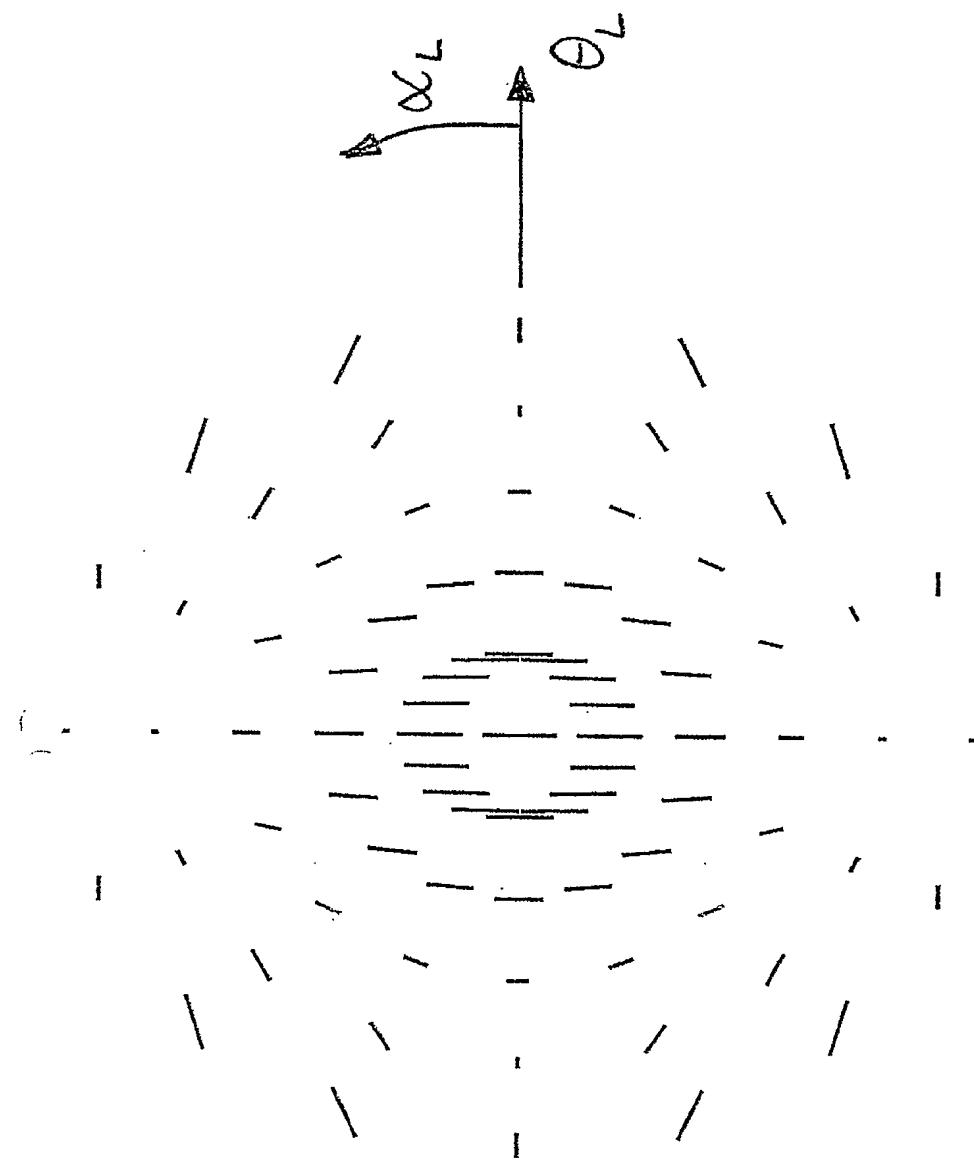


Fig. 6C

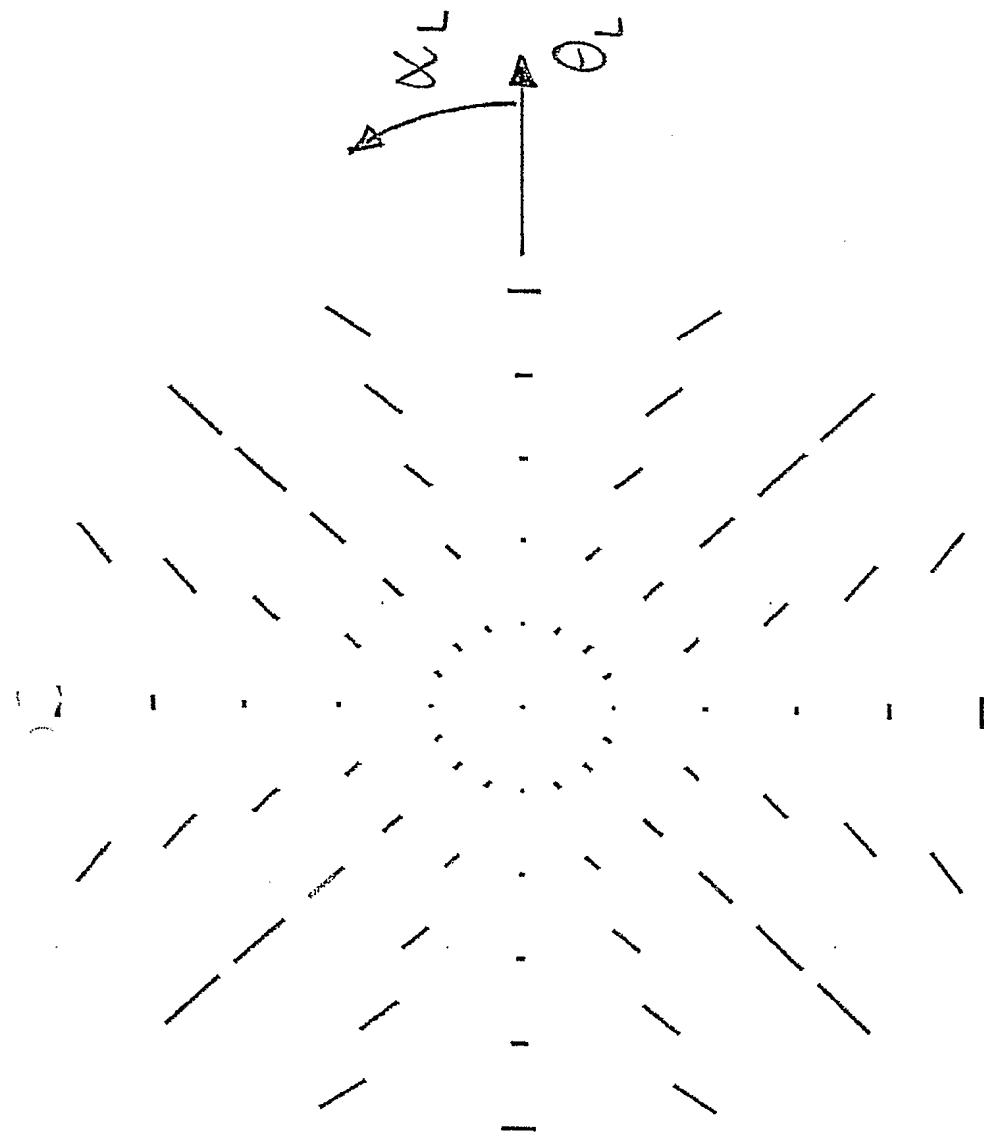


Fig. 6D

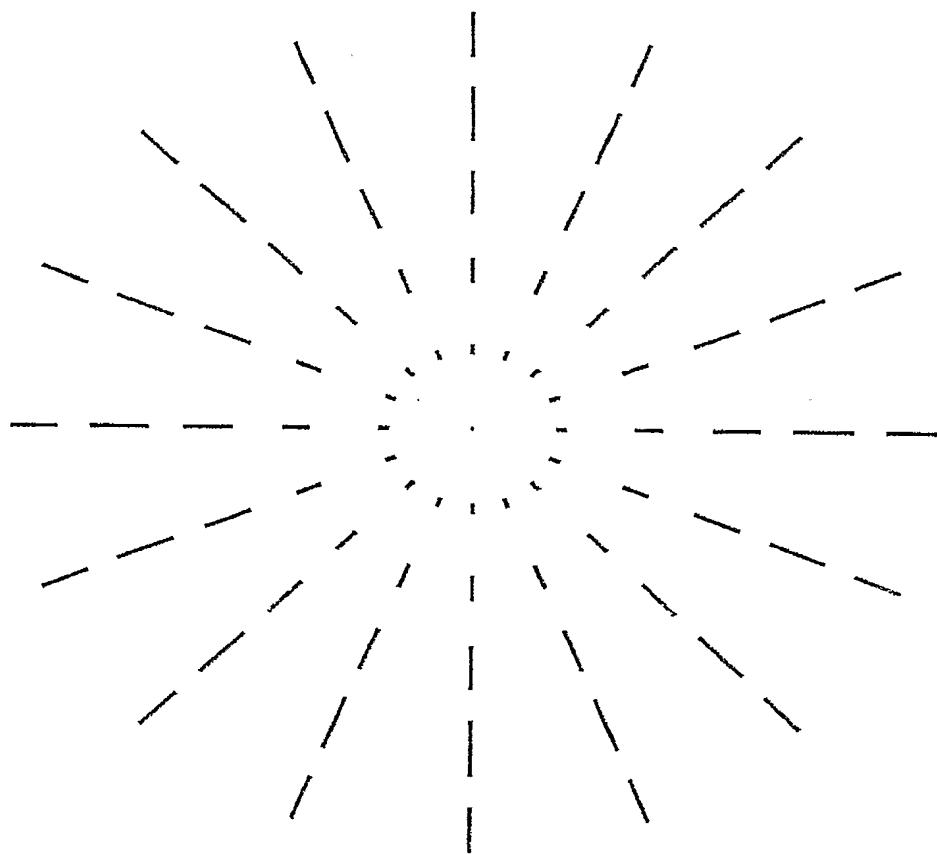


Fig. 6 E

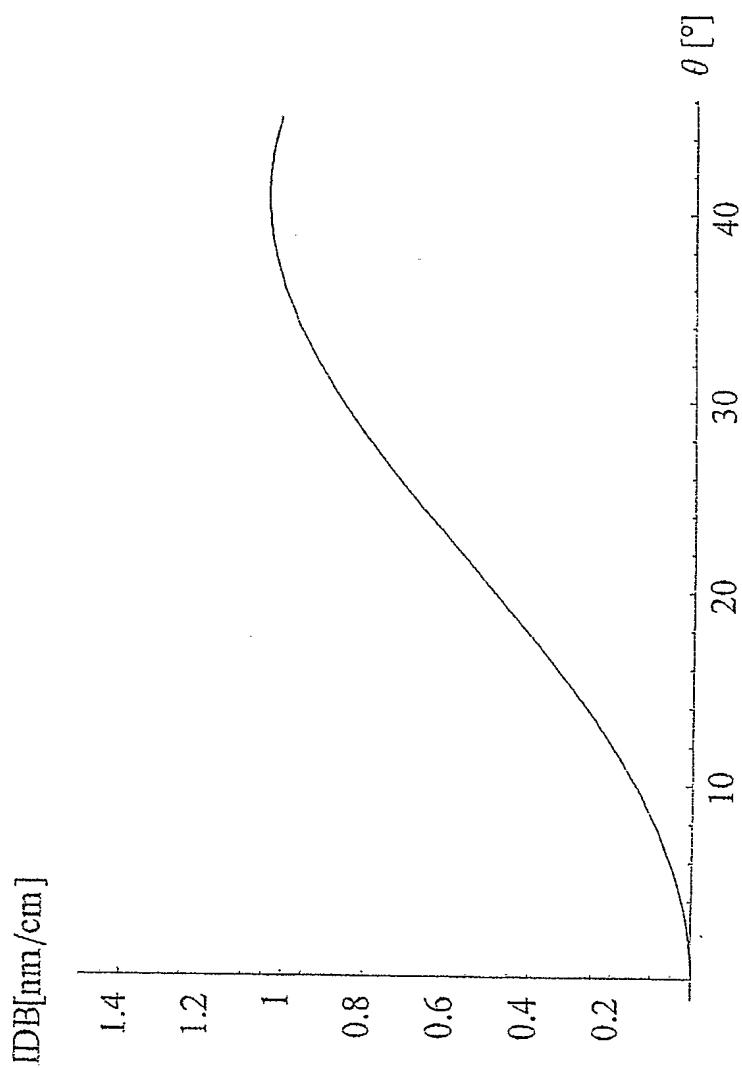


fig. 6 π

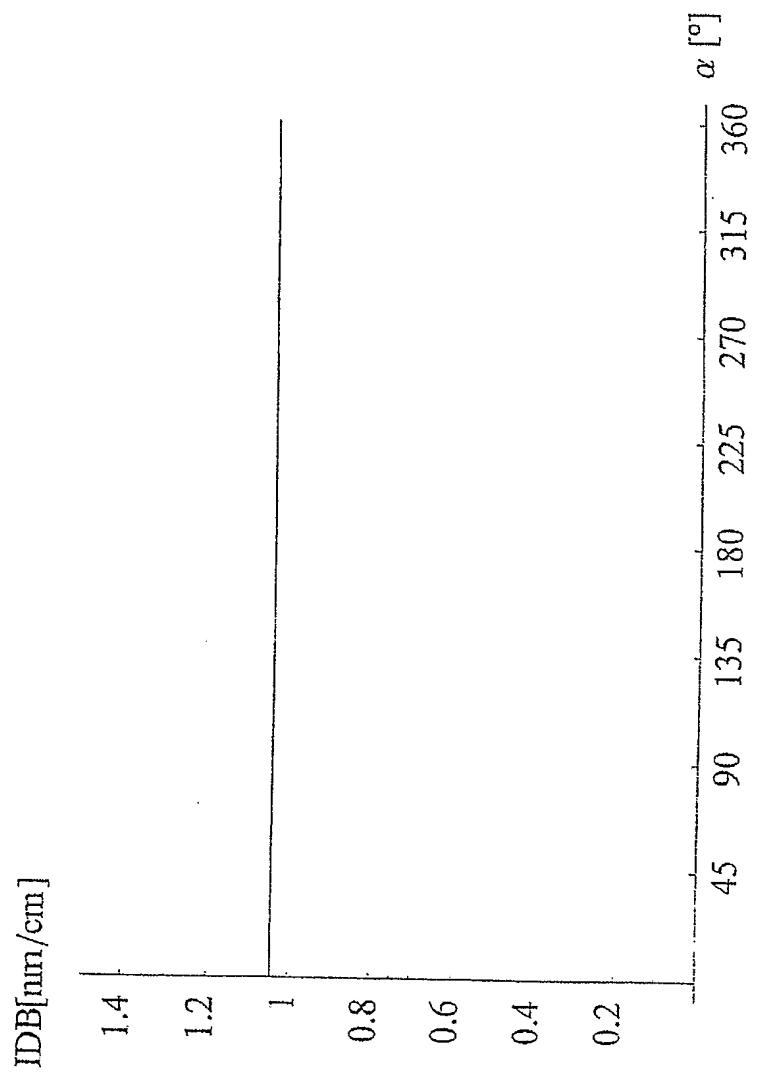


Fig. 6G

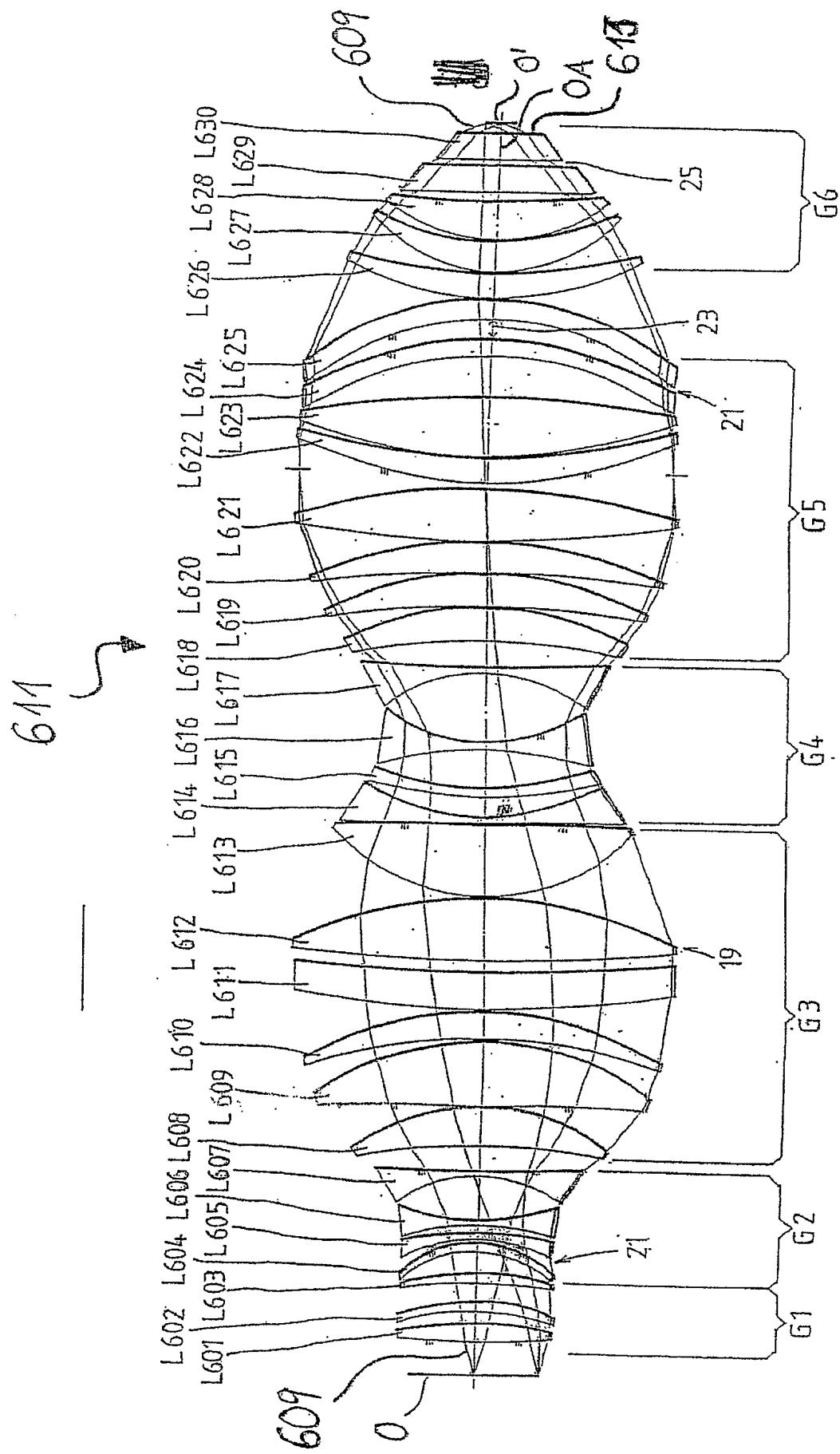
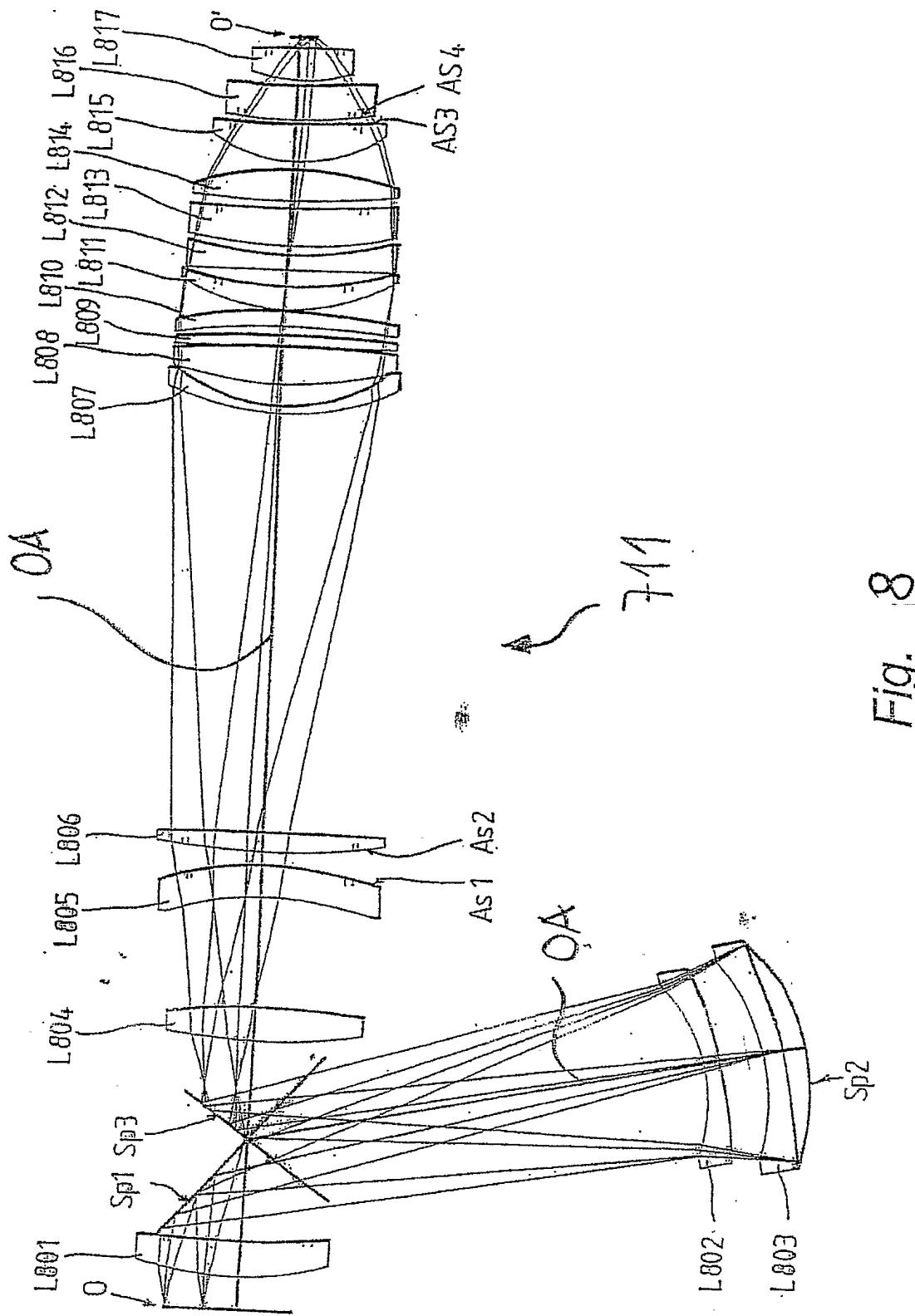


Fig. 7



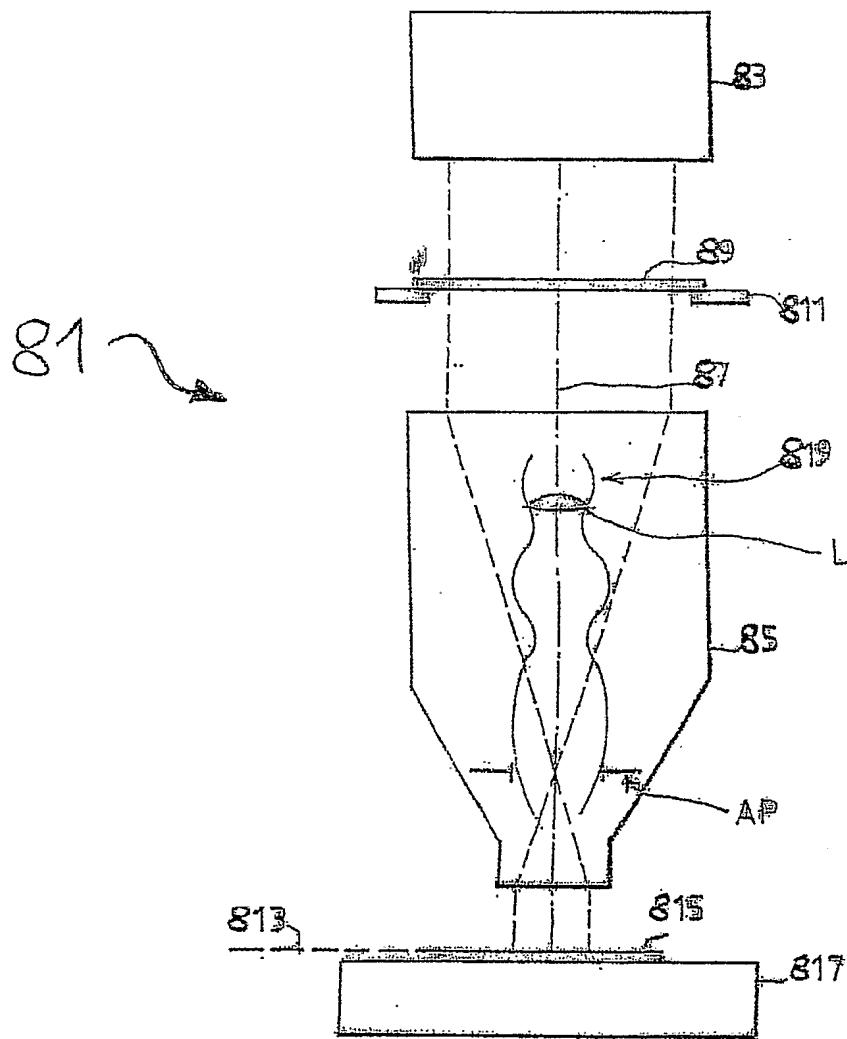


Fig. | 9

Fig. 10

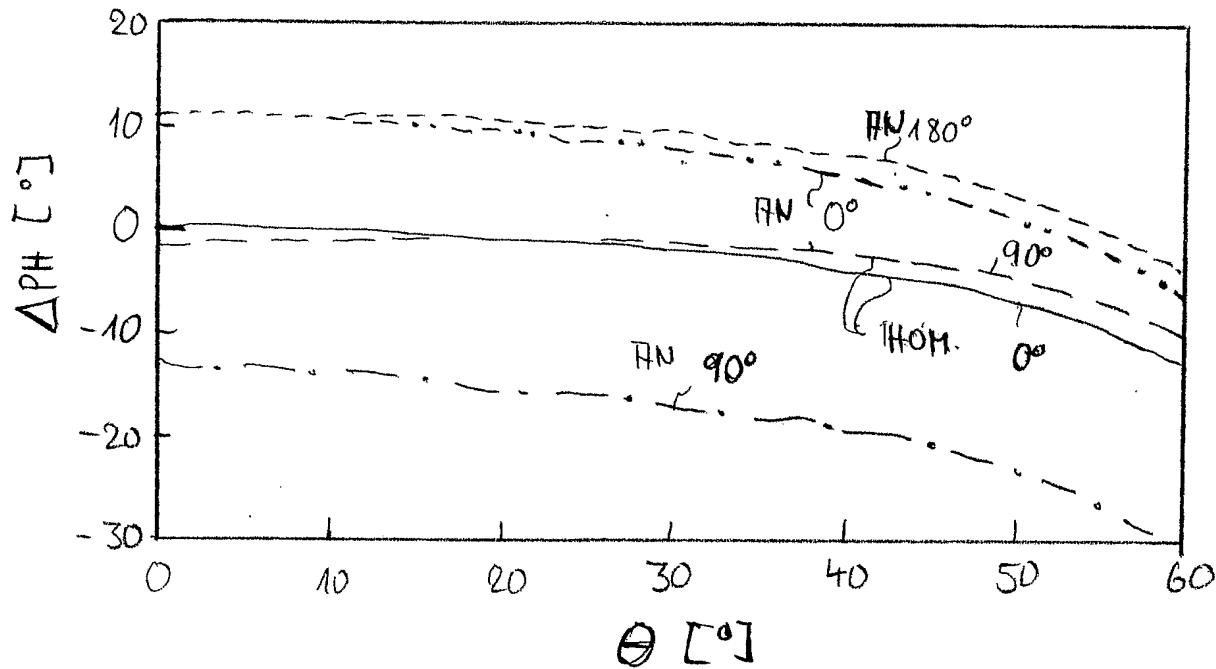


Fig. 11

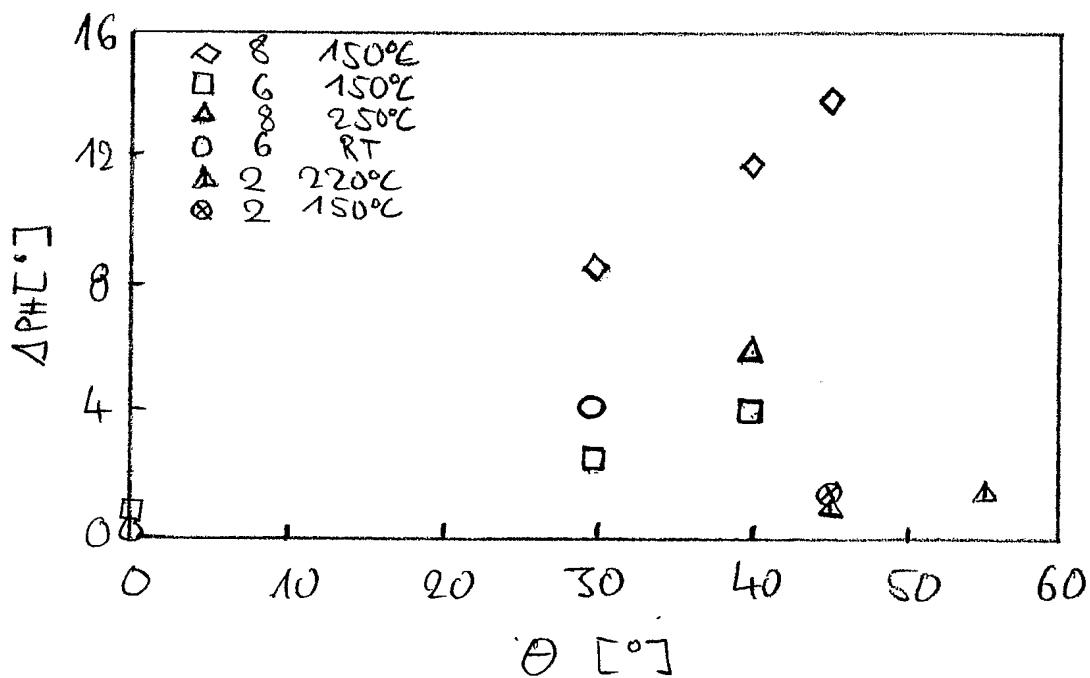


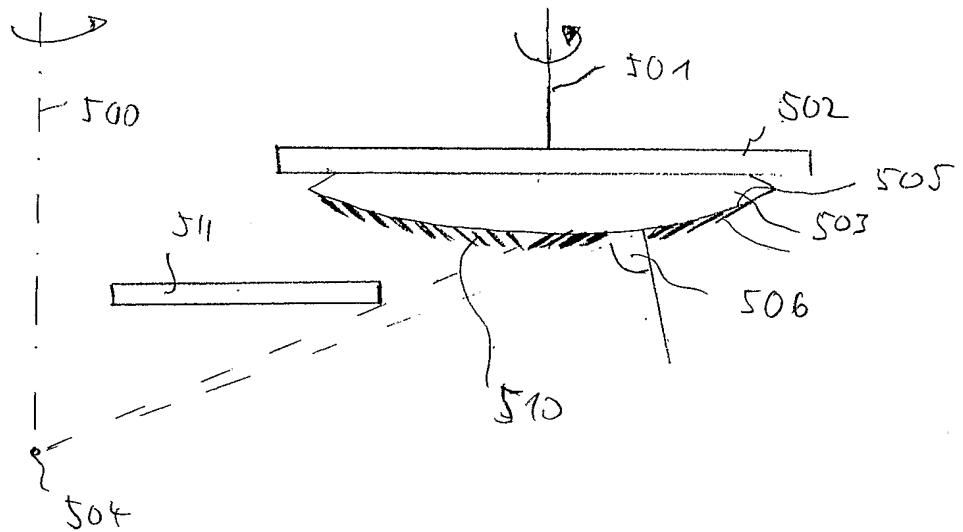
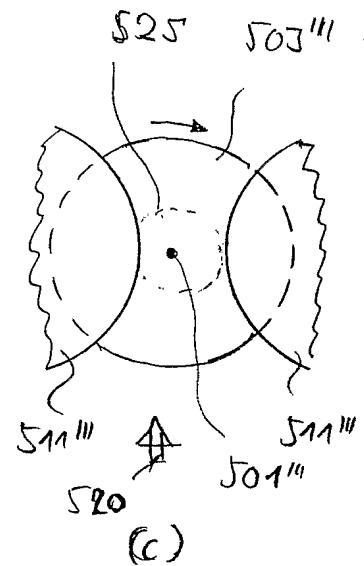
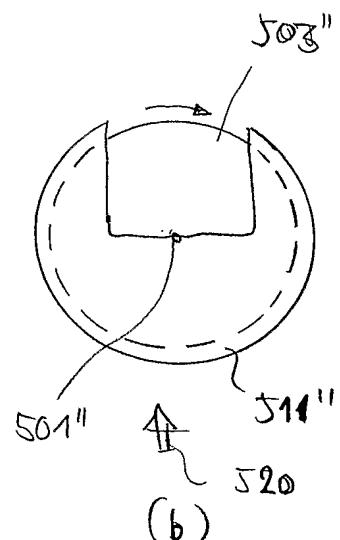
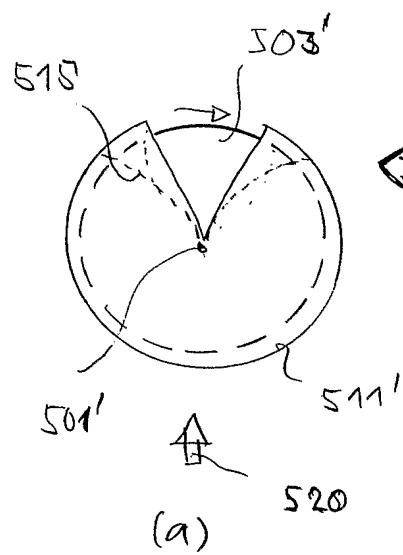
Fig. 12Fig. 13

Fig. 14